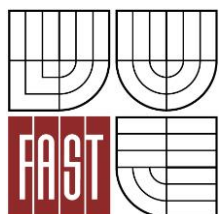




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV KOVOVÝCH A DŘEVĚNÝCH KONSTRUKCÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF METAL AND TIMBER STRUCTURES

STUDIE PŘESNOSTI STABILITNÍHO VÝPOČTU

STUDY OF PRECISION OF THE STABILITY ANALYSIS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JIŘÍ SOTULÁŘ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. LUKÁŠ HRON

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3647R013 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav kovových a dřevěných konstrukcí

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Jiří Sotulář
Název	Studie přesnosti stabilitního výpočtu
Vedoucí bakalářské práce	Ing. Lukáš Hron
Datum zadání bakalářské práce	30. 11. 2014
Datum odevzdání bakalářské práce	29. 5. 2015

V Brně dne 30. 11. 2014

doc. Ing. Marcela Karmazínová, CSc.
Vedoucí ústavu



prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

BARTLOVÁ, Alice. Vzpěr prutových soustav. 1. vyd. Praha: SNTL, 1977, 218 s.

Platné normy pro určení účinků zatížení a pro navrhování ocelových konstrukcí:

ČSN EN 1991-1-1 Zatížení konstrukcí - Část 1-1: Obecná zatížení – Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb.

ČSN EN 1991-1-3 Zatížení konstrukcí - Část 1-3: Obecná zatížení - Zatížení sněhem.

ČSN EN 1991-1-4 Zatížení konstrukcí - Část 1-4: Obecná zatížení - Zatížení větrem.

ČSN EN 1993-1-1 Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby.

Zásady pro vypracování (zadání, cíle práce, požadované výstupy)

1. Proveďte ověření základních vzpěrnostních systémů stabilitním výpočtem (bifurkační analýza) ve vybraných výpočetních systémech.
2. Navrhněte nosnou ocelovou konstrukci haly o rozměrech 20 x 42 m a výškou 6,5 m včetně ověření vzpěrných délek stabilitním výpočtem.

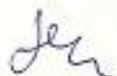
Požadované výstupy:

- Teoretický úvod k problematice ztráty stability tlačných prutů.
- Porovnání základních vzpěrnostních systému vybranými výpočetními systémy.
- Statický výpočet hlavních nosných prvků zadané konstrukce.
- Výkres dispozice.

Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).



Ing. Lukáš Hron
Vedoucí bakalářské práce

Abstrakt

Práce se zabývá přesností stabilitního výpočtu tlačných prutů. Ztráta stability vzpěrem je určována pomocí několika metod, které jsou vzájemně srovnávány. Práce je členěna do tří částí, které na sebe navazují.

První část se zabývá teorií výpočtu ztráty stability vzpěrem. Je zde popsáno postupné řešení analytického výpočtu reálného prutu a závěrečné srovnání ideálního, imperfektního a reálného prutu. Dále je stručně uvedeno řešení vzpěru pomocí softwaru.

Ve druhé části práce je provedena verifikace základních vzpěrných systémů vybranými výpočetními systémy a početními řešeními. Výsledky verifikace jsou pro každý zkoumaný prvek či systém shrnuty do závěrečných tabulek a grafů.

Ve třetí části je proveden návrh a statické posouzení nosných prvků halové skladovací konstrukce. Na prvcích namáhaných na vzpěr jsou aplikovány poznatky z předchozích výpočtů a šetření.

Klíčová slova

Stabilita, vzpěr, ideální prut, Eulerova kritická síla, vzpěrná délka, imperfekce, reálný prut, bifurkační analýza, ocel, skladovací hala

Abstract

The thesis deals with the precision of the stability analysis of the pressed member. The loss of stability of the buckling is determinate by using several methods, which are compared each other. The thesis is partitioned into three parts that works together.

The first part deals with the theory of analysis of the buckling stability. Here is described the gradual solution of analytical analysis for real beam and here is described the final compared for ideal, imperfekt and real beam too. It is also short solved buckling by using software.

In the second part is compared by using computing systems and analytical analysis for several basic buckling systems. The results of the compared are summarised in the final graphs and tables for each solved element and systems.

In the third part are designed and static checked load-bearing element of steel storage hall. The buckling beams are checked by using findings from the previous analysis.

Keywords

Stability, buckling, ideal member, Euler's critical load, buckling length, imperfections, real beam, bifurcation analysis, steel, industrial hall

Bibliografická citace VŠKP

Jiří Sotulář *Studie přesnosti stabilitního výpočtu*. Brno, 2015. 111 s., 16 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav kovových a dřevěných konstrukcí. Vedoucí práce Ing. Lukáš Hron

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 17.5.2015

.....
podpis autora
Jiří Sotulář

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY VŠKP

Prohlášení:

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 17.5.2015

.....
podpis autora
Jiří Sotulář

Poděkování

Děkuji Ing. Lukáši Hronovi, Ph.D. za odborné vedení bakalářské práce a poskytování cenných rad, které mi v průběhu zpracování práce poskytl.

Dále bych rád poděkoval Ing. Ondřeji Peškovi a Ing. Josefu Martináskovi za odbornou pomoc s řešením úkolů v softwaru ANSYS.

Obsah

1	ZTRÁTA STABILITY TVARU PRVKU.....	- 12 -
1.1	Úvod	- 12 -
1.1.1	Definice ztráty stability.....	- 12 -
1.1.2	Stabilitní stavy	- 12 -
1.1.3	Vzpěrný tlak, vzpěrná pevnost	- 13 -
1.2	Analytické řešení	- 14 -
1.2.1	Eulerovo řešení stability přímého prutu.....	- 14 -
1.2.2	Prut oboustranně kloubově podepřený	- 14 -
1.2.3	Eulerova kritická síla, vzpěrná délka.....	- 16 -
1.2.4	Kritické napětí, kritická štíhlost prutu	- 17 -
1.2.5	Vzpěrná únosnost skutečného prutu	- 18 -
1.2.6	Závěrečné srovnání tlačných štíhlých prutů	- 21 -
1.3	Softwarové řešení.....	- 22 -
1.3.1	Globální analýza v pružné oblasti	- 22 -
1.3.2	Stabilita prutových konstrukcí – lineární řešení (teorie I. řádu).....	- 22 -
1.3.3	Stabilita prutových konstrukcí – nelineární řešení (teorie II. řádu).....	- 23 -
1.3.4	Globální analýza v plastické oblasti.....	- 23 -
2	VERIFIKACE KRITICKÝCH VZPĚRNÝCH PARAMETRŮ	- 24 -
2.1	Kloubově uložený přímý prut	- 26 -
2.2	Jednostranně vetknutý prut s proměnným průřezem	- 31 -
2.3	Rám.....	- 44 -
2.3.1	Kloubově uložený jednopodlažní rám – symetrické zatížení	- 44 -
2.3.2	Kloubově uložený jednopodlažní rám – nesymetrické zatížení	- 49 -
3	KONSTRUKCE OCELOVÉ SKLADOVACÍ HALY	- 53 -
3.1	Popis konstrukce	- 53 -
3.2	Geometrie příčné vazby	- 54 -
3.3	Dimenze prvků konstrukce.....	- 54 -
3.4	Zatížení	- 55 -
3.4.1	Zatížení stálé.....	- 55 -
3.4.2	Zatížení sněhem.....	- 56 -
3.4.3	Zatížení větrem.....	- 57 -
3.4.4	Užitné zatížení	- 60 -
3.4.5	Stabilizační zatížení.....	- 60 -

3.5	Kombinace zatížení.....	- 61 -
3.5.1	Přehled zatěžovacích stavů	- 61 -
3.5.2	Přehled kombinací.....	- 61 -
3.5.3	Kombinační klíč.....	- 62 -
3.6	Vnitřní síly.....	- 63 -
3.6.1	Příhradový vazník	- 63 -
3.6.2	Stabilizační prut TR73/3,6	- 64 -
3.6.3	Sloup HEB180	- 64 -
3.6.4	Stěnové ztužení KR20	- 64 -
3.6.5	Střešní ztužení KR16	- 64 -
3.7	Vzpěrné délky nosných prvků.....	- 65 -
3.7.1	Sloup	- 65 -
3.7.2	Příhradový vazník	- 69 -
3.7.3	Stabilizační pruty	- 70 -
3.7.4	Ztužení	- 70 -
3.8	Posouzení prvků konstrukce na MSÚ	- 71 -
3.8.1	Příhradový vazník	- 71 -
3.8.2	Stabilizační pruty TR73/3,6.....	- 84 -
3.8.3	Sloup HEB180	- 86 -
3.8.4	Stěnové ztužení KR20	- 92 -
3.8.5	Střešní ztužení KR16	- 92 -
3.8.6	Srovnání početního řešení a posudků ze softwaru SCIA Engineer	- 93 -
3.9	Posouzení vybraných detailů na MSÚ	- 94 -
3.9.1	Přípoj horního pásu vazníku na sloup.....	- 94 -
3.9.2	Přípoj dolního pásu vazníku na sloup	- 97 -
3.9.3	Přípoj stabilizačního prutu a střešního ztužení na krajní vazník.....	- 99 -
3.9.4	Přípoj diagonál na dolní pás vazníku	- 101 -
3.9.5	Kotvení sloupu	- 104 -
3.10	Posouzení konstrukce na MSP.....	- 108 -
4	ZÁVĚR	- 109 -

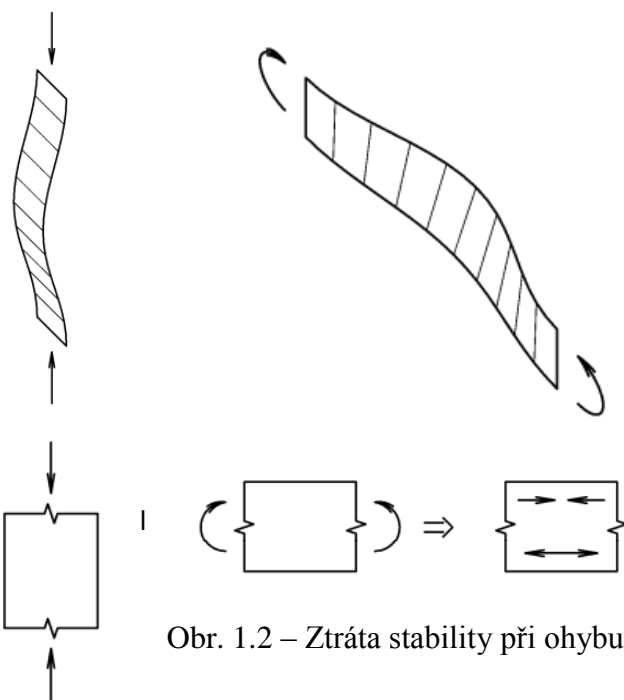
1 ZTRÁTA STABILITY TVARU PRVKU

1.1 Úvod

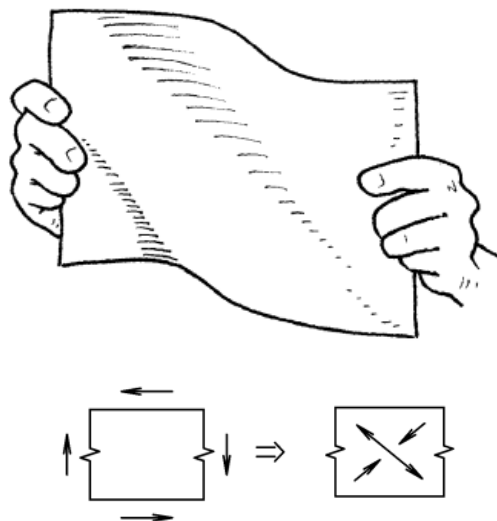
1.1.1 Definice ztráty stability

Stabilita je schopnost vychýlené (zatížené) soustavy zachovat nebo obnovit původní rovnovážný stav bez samovolného narůstání deformací soustavy. Je-li soustava nestabilní (labilní) pokračuje deformace samovolně dále i po odstranění zdroje vychýlení.

Ke ztrátě stability dochází při namáhání osovým tlakem, ohybem nebo při namáhání smykem. Všeobecně lze říci, že problém stability nastane vždy u štíhlých prutů vzdorujících tlakovým napětím.



Obr. 1.2 – Ztráta stability při ohybu [2]



Obr. 1.3 – Ztráta stability při smyku [2]

Obr. 1.1 – Ztráta stability při tlaku [2]

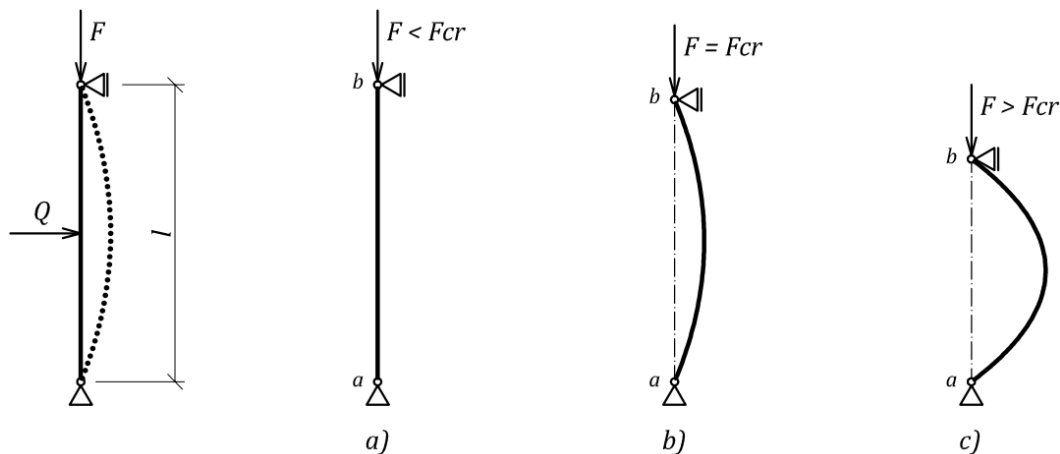
1.1.2 Stabilitní stavy

Průběh působení centricky tlačného prutu můžeme rozdělit do 3 stabilitních stavů (obr. 1.4), které jsou určeny velikostí deformací prutu po odtížení.

- a) Stabilitní stav
 - po odtížení se prut vrací do své původní polohy
 - nulové deformace
- b) Indiferentní (mezilehlý případ – čistě teoretický) stav
 - po odtížení zůstane prut vychýlen
 - deformace zůstávají konstantní

c) Nestabilní stav

- po odtížení se prut dále vychyluje
- deformace samovolně rostou



F zatěžovací osová síla

F_{cr} kritická síla

Q příčná síla vyvolávající počáteční vychýlení prutu

Obr. 1.4 – Stabilitní stavy – příklad tlačného prutu

1.1.3 Vzpěrný tlak, vzpěrná pevnost

Vzpěrný tlak je tlakové namáhání štíhlých prutů, které mohou vybočit ze svého původně přímého tvaru. Odolností proti tomuto vybočení je vzpěrná pevnost.

Jedná se o velmi složitý jev, který je zásadně ovlivněn mnoha faktory.

- geometrickými charakteristikami (délka prutu, průřez prvku,...)
- spolupůsobení v konstrukci (uložení, spoje,...)
- materiálové vlastnosti (modul pružnosti v tlaku, tuhost)
- zatížení
- počáteční napjatost

Ztráta stability nastává při dosažení **kritické hodnoty tlakové síly F_{cr}** .

1.2 Analytické řešení

1.2.1 Eulerovo řešení stability přímého prutu

Vyšetření kritické síly je možné různými postupy, nejznámější a nejpoužívanější je Eulerovo řešení vycházející z diferenciální rovnice ohybové čáry. Předpokladem pro toto řešení je použití *ideálního prutu*.

Ideální prut se vyznačuje charakteristickými vlastnostmi.

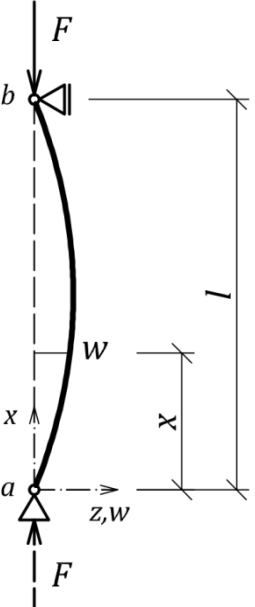
- přímý prut
- ideálně (nekonečně) pružný, homogenní po celé délce
- tlaková síla působící v ose prutu
- dokonalé uložení – nepružné, bez tření
- izolovaný – nenachází se v konstrukci

Takový prut je ovšem nereálný a to z hlediska technologie výroby (geometrické a strukturální imperfekce) i způsobu uložení v konstrukci (konstrukční imperfekce).

Při použití Eulerova řešení je uvažováno s *teorií II. řádu*, tj. statické účinky budeme vyšetřovat na deformovaném prutu, neboť jediné tak jsem schopni do výpočtu zahrnout ohybové momenty vyvolané tlakovou silou na rameni závislém na velikosti průhybu, který je ovšem řádově menší než délka prutu – *teorie malých deformací*.

Z použití teorie II. řádu vyplývá, že se jedná o nelineární úlohu s omezeným užitím principu superpozice.

1.2.2 Prut oboustranně kloubově podepřený



Jedná se oboustranně kloubově podepřený prut stálého průřezu zatížený tlakovou silou F .

- z momentových podmínek plyne, že vodorovné podporové reakce jsou rovny nule, takže ohybový moment v obecném průřezu, počítaný podle teorie II. řádu, tedy na deformovaném prutu, je roven:

$$M = M_{(x)} = F \cdot w \quad (1.1)$$

- dosazením do diferenciální rovnice ohybové čáry II. řádu je:

$$w'' = -\frac{M}{E \cdot I} = -\frac{F}{E \cdot I} \cdot w \quad (1.2)$$

- zavedeme substituci:

$$\alpha^2 = \frac{F}{E \cdot I} \quad (1.3)$$

Obr. 1.5

- rovnice (1.2) po úpravě:

$$w = -\alpha^2 \cdot w \rightarrow w + \alpha^2 \cdot w = 0 \quad (1.4)$$

– její obecné řešení:

$$w = C_1 \cdot \sin(\alpha \cdot x) + C_2 \cdot \cos(\alpha \cdot x) \quad (1.5)$$

Užití okrajových podmínek – v obou uloženíh je nulový průhyb a dosazení do rovnice (1.5).

– uložení a)

$$w_{(x=0)} = 0 \rightarrow C_1 \cdot \sin(\alpha \cdot 0) + C_2 \cdot \cos(\alpha \cdot 0) = 0 \quad (1.6)$$

$$C_2 = 0$$

– uložení b)

$$w_{(x=l)} = 0 \rightarrow C_1 \cdot \sin(\alpha \cdot l) + C_2 \cdot \cos(\alpha \cdot l) = 0 \quad (1.7)$$

- řešení rovnice (1.7): a) $C_1 = 1$...nulový průhyb - přímý prut - stabilní případ
 b) $C_1 \cdot \sin(\alpha \cdot l) = 0$...ohnutý prut - stabilitní řešení

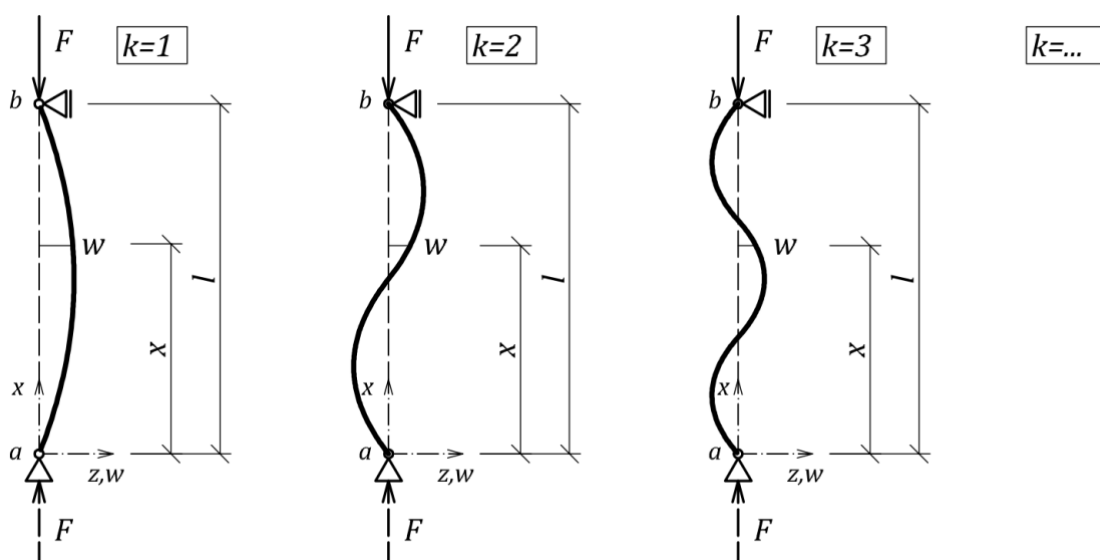
– **stabilitní podmínka:**

$$\sin(\alpha \cdot l) = 0 \quad (1.8)$$

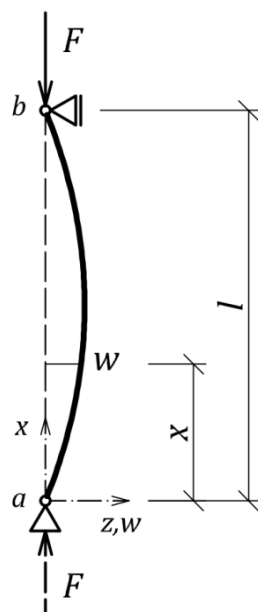
Ze stabilitní podmínky vyplývá, že prut může vybočit ve tvaru sinusovky o k půlvlnách při dosažení příslušné k -té kritické síly, proto řešení podmínky vychází z grafu funkce $\sin(\alpha l)$.

$$\alpha \cdot l = k \cdot \pi \quad \text{pro } k = 1, 2, 3 \dots \quad (1.9)$$

$$\alpha = \frac{k \cdot \pi}{l}$$



Obr. 1.6 – Ztráta stability kloubově podepřeného prutu



- praktický význam má řešení pouze pro $k = 1$, proto výsledkem řešení stabilitní podmínky je:

$$\alpha = \frac{\pi}{l} \quad (1.10)$$

- zpětná substituce:

$$\alpha^2 = \frac{F}{E \cdot I} = \frac{\pi^2}{l^2} \quad (1.11)$$

- po úpravě dostaneme **Eulerovu kritickou sílu**:

$$F = F_{cr} = \pi^2 \cdot \frac{E \cdot I}{l^2} \quad (1.12)$$

Při dosažení této hodnoty tlakové kritické síly nastane u oboustranně kloubově uloženého prutu **ZTRÁTA STABILITY**.

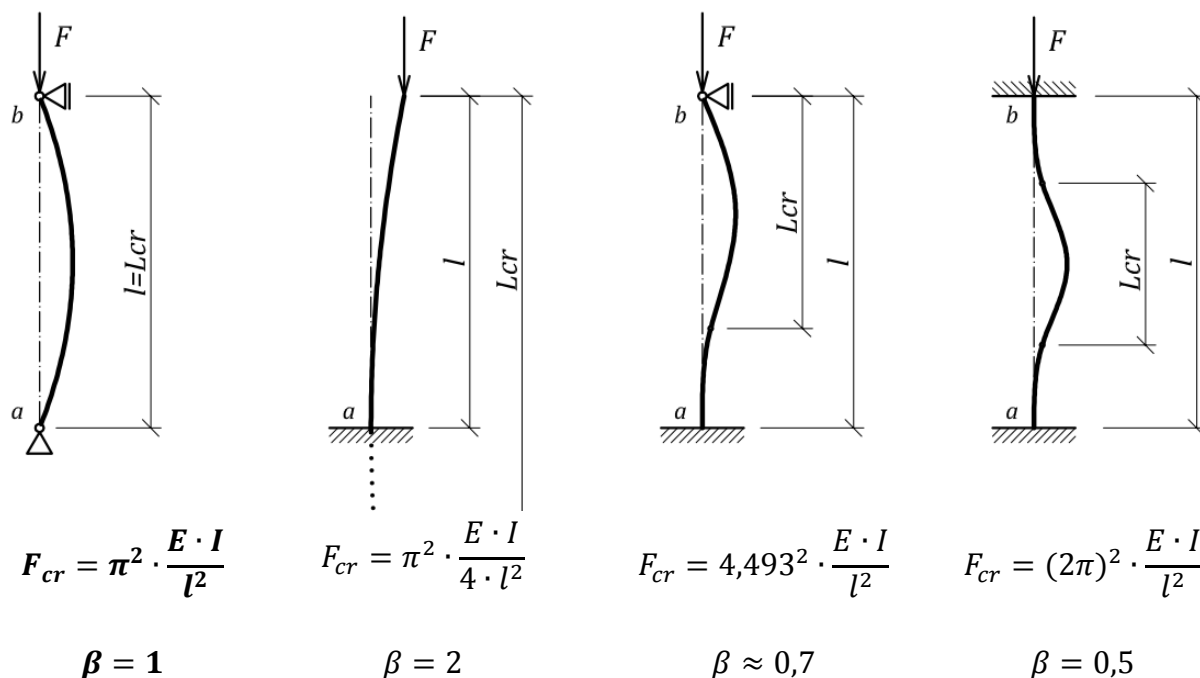
Obr. 1.7

Poznámky k řešení:

- C_1 je neurčena, řešení odpovídá indiferentnímu stavu
- stejné okrajové podmínky ve všech směrech
- prut vybočí ve směru menší tuhosti I_{min}

1.2.3 Eulerova kritická síla, vzpěrná délka

Podobným způsobem můžeme určit kritickou sílu i pro další základní způsoby podepření prutu, výpočet se bude lišit z důvodu jiného tvaru ohybové čáry prutu, což je způsobeno různými okrajovými podmínkami.



Obr. 1.8 – Přehled základních Eulerových příkladů, vzpěrné délky (viz. níže)

Základní Eulerovy případy (a také jiné další) můžeme formálně sjednotit tak, že kritickou sílu pružného prutu stálého průřezu vyjádříme souhrnně ve tvaru:

$$F_{cr} = \pi^2 \cdot \frac{E \cdot I}{L_{cr}^2}, \quad (1.13)$$

kde

$$L_{cr} = \beta \cdot l. \quad (1.14)$$

L_{cr} je **vzpěrná délka** (označována také: volná, kritická, efektivní,...), pomocí níž převádíme pruty různě uložené na základní případ kloubově uloženého prutu, lze ji tedy definovat jako délku kloubově uloženého prutu shodné ohybové tuhosti EI , který ztratí stabilitu při stejné kritické síle F_{cr} . Současně je vzpěrná délka rovna délce sinusové půlvlny (vzdálenost inflexních bodů) ohybové čáry po vybočení prutu (viz. Obr. 1.8). β je součinitel vzpěrné délky.¹

1.2.4 Kritické napětí, kritická štíhlost prutu

Z velikosti kritické síly můžeme určit **kritické napětí** σ_{cr} , které odpovídá hodnotě tlakového napětí v okamžiku dosažení kritické síly, avšak před vybočením (dostředný tlak).

$$\sigma_{cr} = \frac{F_{cr}}{A} = \pi^2 \cdot \frac{E \cdot I}{A \cdot L_{cr}^2} = \pi^2 \cdot E \cdot \frac{i^2}{L_{cr}^2} = \pi^2 \cdot \frac{E}{\lambda^2} \quad (1.15)$$

$$\lambda = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{\sigma_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \quad (1.16)$$

λ je **kritická štíhlost** (štíhlostní poměr), která souhrnným způsobem charakterizuje geometrické parametry prutu a jeho podepření. Kritickou štíhlost je třeba určovat pro všechny reálné způsoby ztráty stability (vybočení v různých směrech), tzn. zohlednit tvary průřezu a osy vybočení.

Způsoby ztráty stability:

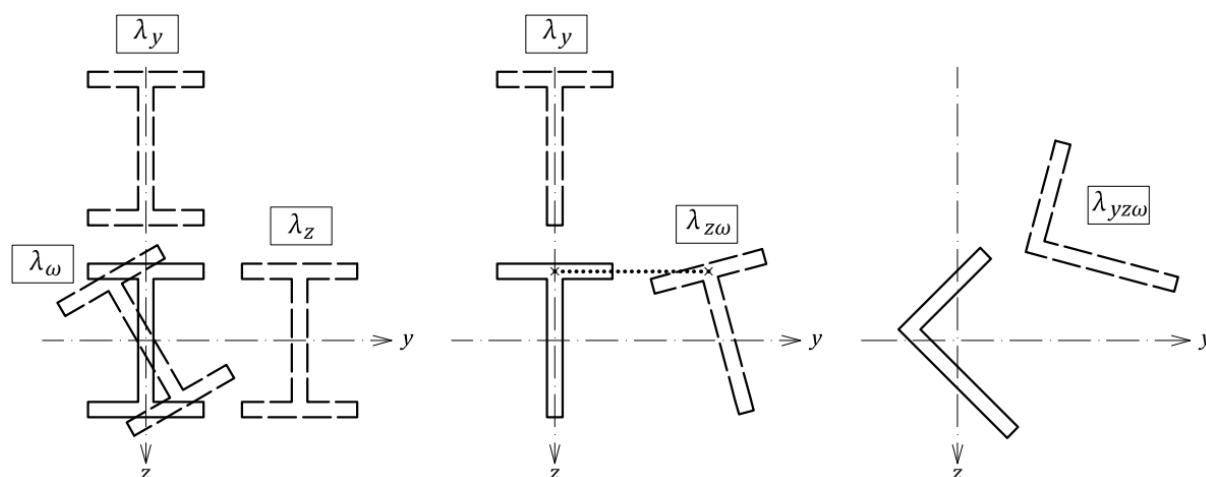
a) Rovinný vzpěr – λ_y, λ_z

- prut se deformuje ohybem v rovině osy symetrie průřezu (roviny os y, z)
- použití pro uzavřené, plné a osově symetrické průřezy

b) Prostorový vzpěr – $\lambda_{\omega}, \lambda_{i\omega}$ (i – dle roviny ohybu)

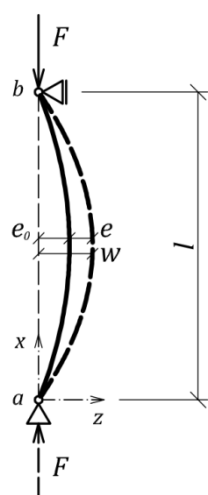
- vychází z obecné teorie stability prutů dle Vlasova
- prut se deformuje zkroucením kolem podélné osy x (dvouose symetrický průřez), nebo kombinací rovinného vzpěru a zkroucení
- použití pro otevřené, symetrické i nesymetrické průřezy

¹ V Eurokódu 3 (EN 1993 – 1 - 1:2005) je součinitel vzpěrné délky označován jako k (k_x, k_z).



Obr. 1.9 – Tvary vybočení otevřených průřezů [2]

1.2.5 Vzpěrná únosnost skutečného prutu



Obr. 1.10 - Prut s počátečním zakřivením

Dutheilův model imperfektního prutu

Jak bylo řečeno již výše, ideální prut se ve skutečných konstrukcích nevyskytuje, proto je zapotřebí pro výpočet reálných konstrukcí uvažovat prut s počáteční geometrickou imperfekcí ve formě počátečního zakřivení prutu s limitní výchylkou $e \rightarrow$ **stabilitní problém převádíme na pevnostní řešení (excentrický tlačенý prut).**

Diferenciálním řešením ohybové čáry tohoto zakřiveného prutu se počáteční výchylka zvětší na výchylku w (teorie II. řádu).

$$w = e_0 + e = \frac{1}{1 - \frac{N}{N_{cr}}} \cdot e_0 \quad (1.17)$$

Na rameni tohoto zakřivení působí síla N , která vyvolává ohybový moment M a této kombinaci zatížení odpovídá napětí σ .

$$M = w \cdot N \rightarrow \sigma = \frac{N}{A} + \frac{M}{W} \quad (1.18)$$

Vzpěrnou únosnost \bar{N} (a příslušné napětí $\bar{\sigma}$) získáme dosazením meze kluzu f_y v krajních vláknech průřezu – Perry - Robertsonův vzorec.

$$\frac{\bar{N}}{A} + \frac{\bar{N} \cdot e_0}{W} \left(\frac{1}{1 - \frac{\bar{N}}{N_{cr}}} \right) = f_y \quad (1.19)$$

– odtud plyne *součinitel vzpěrnosti* χ :

$$\chi = \frac{\bar{N}}{f_y} \rightarrow \chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \quad \text{s omezením } \chi \leq 1,0 \quad (1.20)$$

– kde:

$$\phi = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha_1 \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2 \right] \quad (1.21)$$

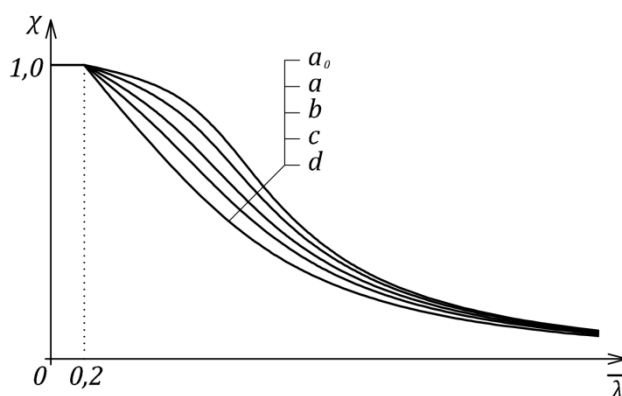
Součinitel vzpěrnosti tedy závisí na *poměrné štíhlosti* $\bar{\lambda}$ a *součiniteli imperfekce* α_1 , který zahrnuje počáteční imperfekci e_0 (hodnoty viz níže - Tabulka 1).

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_1} \quad (1.22)$$

– kde λ_1 je *srovnávací štíhlost* dle vztahu:

$$\lambda_1 = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93,9\varepsilon \quad (1.23)$$

Závislost součinitele vzpěrnosti χ a poměrné štíhlosti $\bar{\lambda}$ je dána *křivkou vzpěrné pevnosti*. Rozlišujeme 5 křivek vzpěrné pevnosti, kde každá z nich je charakterizována materiálem, typem průřezu a způsobem vybočení zkoumaného prutu.⁽²⁾



Obr. 1.11 – Křivky vzpěrné pevnosti ^[12]

Tabulka 1 – Součinitele imperfekce pro křivky vzpěrné pevnosti

Křivka vzpěrné pevnosti	a_0	a	b	c	d
Součinitel imperfekce α	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

⁽²⁾ Přiřazení křivek jednotlivým průřezům je určeno tabulkou v normě, pro účely mé práce není zapotřebí uvádět.

Posouzení na vzpěrnou únosnost

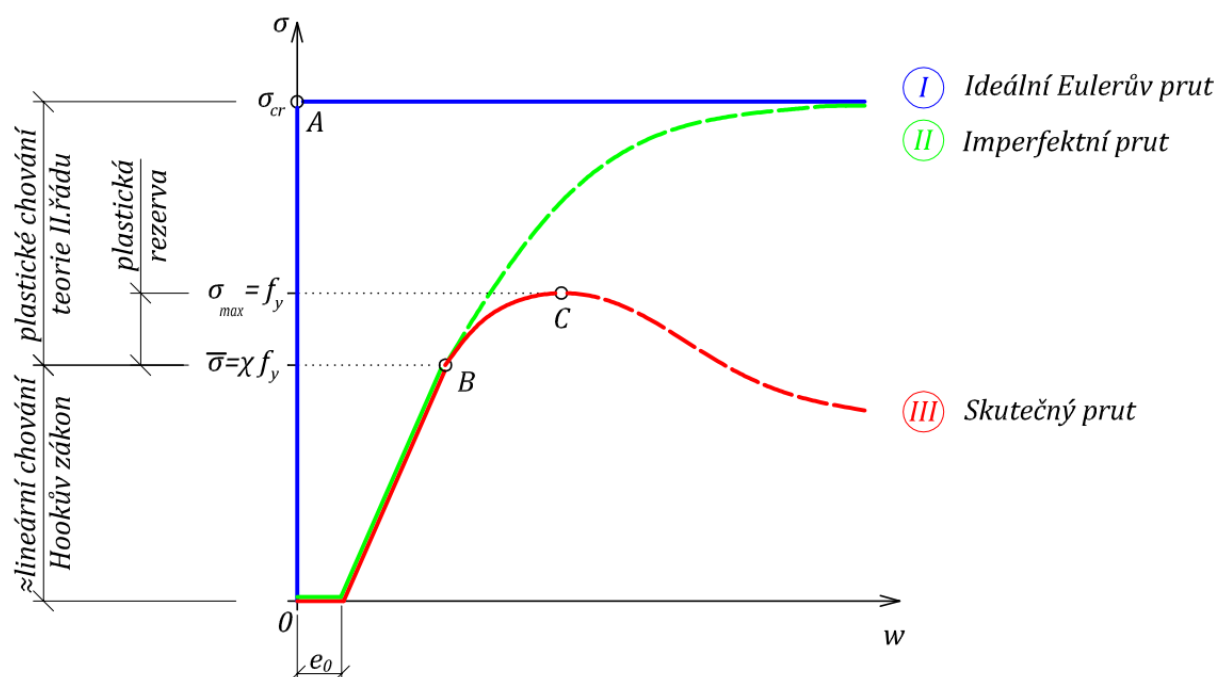
Jak je možné vidět z textu výše, únosnost prutu namáhaného na vzpěr je ovlivněna především samotným průřezem prutu a s ním úzce souvisejícím součinitelem vzpěrnosti χ . Z těchto faktorů vyplývá i normový vztah pro **vzpěrnou únosnost** $N_{b,Rd}$ ⁽³⁾, která musí být větší než návrhová tlaková síla N_{Ed} .

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \quad (1.24)$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1 \quad (1.25)$$

⁽³⁾ Vztah je zapsán obecně pro všechny typy průřezů, ovšem pokud bychom počítali s průřezem typu 4, bylo by nutné počítat s efektivní plochou A_{eff} .

1.2.6 Závěrečné srovnání tlačných štíhlých prutů



Obr. 1.12 – Srovnání tlačných štíhlých prutů

- **Bod A**
 - **bifurkační bod** – rozdělení rovnováhy
 - bod, ve kterém nastává teoretický indiferentní stav, při němž je právě dosaženo kritického napětí a po překročení tohoto napětí začíná deformace (vybočení) prutu, prut plastizuje
 - je možné ho uvažovat pouze na ideálním prutu
- **Bod B**
 - bod, ve kterém je dosaženo **vzpěrné únosnosti prutu** (normové posouzení – mez kluzu zmenšená součinitelem vzpěrnosti)
 - do tohoto bodu je možné uvažovat teoretické chování prutu dle Hookova zákona, tzn. lineárně pružně
 - po překročení napětí v tomto bodě dochází na prutu k plastickým deformacím
- **Bod C**
 - bod, ve kterém je dosaženo **mezní únosnosti** reálného prutu
 - napětí v tomto bodě se rovná mezi kluzu oceli, po překročení této meze dochází k vyčerpání únosnosti prutu, který se dále samovolně deformuje
- **e_0**
 - uvažovaná počáteční geometrická deformace prutu, zahrnující vliv všech počátečních imperfekcí prutu v konstrukci

1.3 Softwarové řešení

Při řešení ztráty stability ve stavební praxi jsou využívány softwary, které provádějí výpočty pomocí metody konečných prvků. Metoda funguje na základě diskretizace prvků konstrukce na jednotlivé konečné prvky a uzly, v nichž jsou získány výsledky výpočtu. Těmito výsledky při stabilitním výpočtu jsou tvary vybočení prutu a hodnoty vlastních čísel, ze kterých je následně vypočteno kritické zatížení.

1.3.1 Globální analýza v pružné oblasti

Pokud řešíme ztrátu stability prvku umístěného v reálné konstrukci, je účelné jej při výpočtech řešit v globálním modelu konstrukce, který je vhodný pro příslušný mezní stav a který dostatečně vystihuje chování prutů, spojů a uložení. Tento model zohledňuje spolupůsobení jednotlivých prvků v konstrukci neboli závislost vnitřních sil na deformacích konstrukce (u lineárního výpočtu se jedná o tzv. malé deformace).

Účinky přetvoření konstrukce (*účinky II. řádu*) se mají uvažovat, pokud mají významný vliv na působení zatížení nebo podstatně mění chování konstrukce, což má na ztrátu stability výrazný vliv. Naopak běžnou lineární analýzu I. řádu (LA) můžeme použít, pokud lze zanedbat změny v chování konstrukce vznikající v důsledku deformací. Splnění této podmínky se předpokládá, jestliže je dodrženo:

$$\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{ed}} \geq 10 \rightarrow \text{pružnostní analýza,} \quad (1.26)$$

$$\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{ed}} \geq 15 \rightarrow \text{plasticitní analýza,} \quad (1.27)$$

kde α_{cr} je součinitel kritického zatížení, vyjadřující zvýšení návrhového zatížení pro dosažení ztráty stability. Součinitel kritického zatížení je běžným výstupem při řešení stability v softwarech a je vypočten **lineárně bifurkační analýzou (LBA)** – stabilitní výpočet.

1.3.2 Stabilita prutových konstrukcí – lineární řešení (teorie I. řádu)

1.3.2.1 Řešení dle teorie I. řádu bez imperfekcí

Ztráta stability je řešena na fiktivním prutu, jehož vzpěrná délka je určena dle globálního modelu konstrukce (zohlednění uložení, posunů a pootočení prutu). Vzpěrné délky jednotlivých prutů jsou vypočteny ze vztahů pro LBA. Tyto vztahy jsou odvozeny z klasického řešení Eulerovi kritické síly.

$$L_{cr} = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{N_{cr,i}}} = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{\alpha_{cr} \cdot N_{Ed}}} \quad (1.28)$$

Součinitel α_{cr} je výše uvedený poměr návrhové a kritického zatížení získaný LBA.

1.3.2.2 Řešení pomocí poměrné štíhlosti

Tento způsob řešení eliminuje problémy spojené s určením vzpěrných délek prutu a řeší přímo štíhlostní poměr, který je vypočten z kritického napětí (kritické tlakové síly) dosaženého při teoretickém vybočení prutu při ztrátě stability.

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{N_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{\alpha_{cr} \cdot N_{Ed}}} \quad (1.29)$$

Toto řešení je využíváno u většiny dnes dostupného softwaru.

1.3.3 Stabilita prutových konstrukcí – nelineární řešení (teorie II. řádu)

1.3.3.1 Geometricky nelineární řešení imperfektní konstrukce (GNIA)

Účinky II. řádu jsou na konstrukci zavedeny pomocí počátečních globálních i prutových imperfekcí, které následně ovlivní vnitřní síly na konstrukci. Posouzení jednotlivých prutů je provedeno pouze na prosté namáhání.

1.3.3.2 Geometricky nelineární řešení konstrukce pouze s globální deformací (GNA)

Účinky II. řádu jsou na konstrukci zavedeny pomocí tzv. „imperfekce soustavy“. Toto řešení se používá především u patrových konstrukcí, kde je imperfekce způsobena bočním náklonem konstrukce. Posouzení jednotlivých prutů je poté provedeno na ztrátu stability – vzpěrné délky lze konzervativně uvažovat rovny systémovým délkám.

1.3.4 Globální analýza v plastické oblasti

Pomocí softwaru je možné i jednoduše řešit konstrukci pomocí geometricky nelineární analýzy, která využívá rovnice rovnováhy na deformované konstrukci a nelineární geometrické vztahy pro tzv. velké deformace. Softwary nejčastěji používají dvou typických metod plasticitní analýzy:

- 1) **Přírůstkové řešení** – nelineární plasticitní analýza s rozvojem plastických zón
- 2) **Kinematické řešení** – postupná tvorba plastických kloubů na konstrukci → vznik kinematického mechanismu

2 VERIFIKACE KRITICKÝCH VZPĚRNÝCH PARAMETRŮ

V této části práce bude provedeno srovnání kritických vzpěrných hodnot prutů a soustav namáhaných osovým tlakem.

Na základních případech, které se mohou vyskytovat ve stavební praxi, budou porovnány tyto parametry:

- a) **Součinitel vzpěrné délky β**
- b) **Vzpěrná délka L_{cr}**
- c) **Kritické zatížení F_{cr}**

Parametry budou zjištěny pomocí následujících několika metod:

1) Analytické řešení

- kritické hodnoty vypočteny pomocí Eulerovi metody (popsáno výše)

2) Tabulkové řešení

- kritické hodnoty odečteny z příslušných tabulek, grafů a vzorců z vybrané literatury zabývající se vzpěrem prutů a soustav

3) Software Scia Engineer

- celosvětově rozšířený software pro analýzu obecných stavebních konstrukcí pomocí metody konečných prvků
- pro výpočet využita česká lokalizace Scia Engineer 14.0.01043 – Studentská verze
- kritické hodnoty vypočteny integrovaným řešičem FEM

4) Software Dlubal - RSTAB

- software pro analýzu prutových stavebních konstrukcí rozšířený především v německy mluvících zemích a v posledních letech i ČR
- pro výpočet využita česká lokalizace RSTAB 8.01.0119 Student
- kritické hodnoty vypočteny přídatným modulem RSBUCK – Stabilitní analýza

5) Software Dlubal - RFEM

- software pro analýzu obecných stavebních konstrukcí metodou konečných prvků rozšířený především v německy mluvících zemích a v posledních letech i ČR
- pro výpočet využita česká lokalizace RFEM 5.01.0119 Student
- kritické hodnoty vypočteny přídatným modulem RF-STABILITY – Stabilitní analýza

6) Software AxisVM

- software pro analýzu obecných stavebních konstrukcí metodou konečných prvků rozšířený v mnoha zemích světa
- pro výpočet využita česká lokalizace AxisVM 12 R3e – Student
- kritické hodnoty vypočteny modulem Stabilita

7) Software ANSYS

- celosvětově nejpoužívanější software pro obecnou multifyzikální analýzu konstrukcí metodou konečných prvků

Po srovnání budou použity běžně používané ocelové průřezy válcované za tepla z oceli S235JR s těmito charakteristickými vlastnostmi:

Průřezové charakteristiky:	Převzaty z katalogových listů velkoobchodu s hutním materiálem – průřezy dle normy DIN 1025-3.
Objemová hmotnost:	$\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$
Modul pružnosti v tahu a tlaku:	$E = 210\,000 \text{ MPa}$
Modul pružnosti ve smyku:	$G = 81\,000 \text{ MPa}$
Mez kluzu:	$f_y = 235 \text{ MPa}$
Pevnost v tahu:	$f_u = 360 \text{ MPa}$

Pro výpočet pomocí softwarů bude použita stejná hustota sítě konečných prvků, každý nosník bude rozdělen na 100 konečných prvků.

V případě, že průřezové charakteristiky jednotlivých průřezů (načtené z databází použitých softwarů) budou odlišné od charakteristik uvedených v zadání příkladu, bude využito číselného zadávání vlastních průřezů do databáze.

2.1 Kloubově uložený přímý prut

Jedná se o dokonale přímý prut s konstantním průřezem namáhaný osovou tlakovou silou. Prut je na jednom konci uložen na pevnou kloubovou podporu a na druhém konci zajištěn posuvnou podporou.

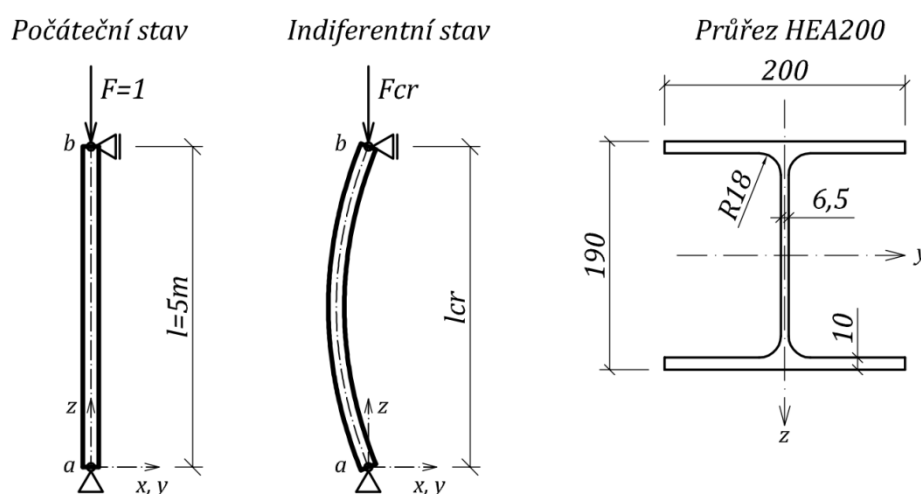
Délka prutu: $l = 5\text{ m}$

Průřez prutu: *Válcovaný profil HEA200*

$$I_y = 3,692 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$$

$$I_z = 1,336 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$$

Zatížení: *Tlaková síla na konci prutu $F = 1 \text{ kN}$*



Obr. 2.1 – Kloubově uložený přímý prut

Analytické řešení

Vybočení kolmo k ose „z“

Odvození vzorců v 1. kapitole (viz výše).

– vzpěrná délka prutu $L_{cr,z}$

$$L_{cr,z} = \beta \cdot l$$

(2.1)

$$L_{cr,z} = 1 \cdot 5000 = \mathbf{5000,00 \text{ mm}}$$

$\beta = 1$... pro oboustranně kloubově uložený prut

– kritické zatížení $F_{cr,z}$

$$F_{cr,z} = \pi^2 \cdot \frac{E \cdot I_z}{L_{cr,z}^2}$$

(2.2)

$$F_{cr,z} = \pi^2 \cdot \frac{(21 \cdot 10^4) \cdot (1,336 \cdot 10^7)}{5000^2} = \mathbf{1107,61 \text{ kN}}$$

Vybočení kolmo k ose „y“

– vzpěrná délka prutu $L_{cr,y}$

$$L_{cr,y} = \beta \cdot l \quad (2.3)$$

$$L_{cr,y} = 1 \cdot 5000 = \mathbf{5000,00 \text{ mm}}$$

$\beta = 1$... pro oboustranně kloubově uložený prut

– kritické zatížení $F_{cr,y}$

$$F_{cr,y} = \pi^2 \cdot \frac{E \cdot I_y}{L_{cr,y}^2} \quad (2.4)$$

$$F_{cr,y} = \pi^2 \cdot \frac{(21 \cdot 10^4) \cdot (3,692 \cdot 10^7)}{5000^2} = \mathbf{3060,84 \text{ kN}}$$

Tabulkové řešení

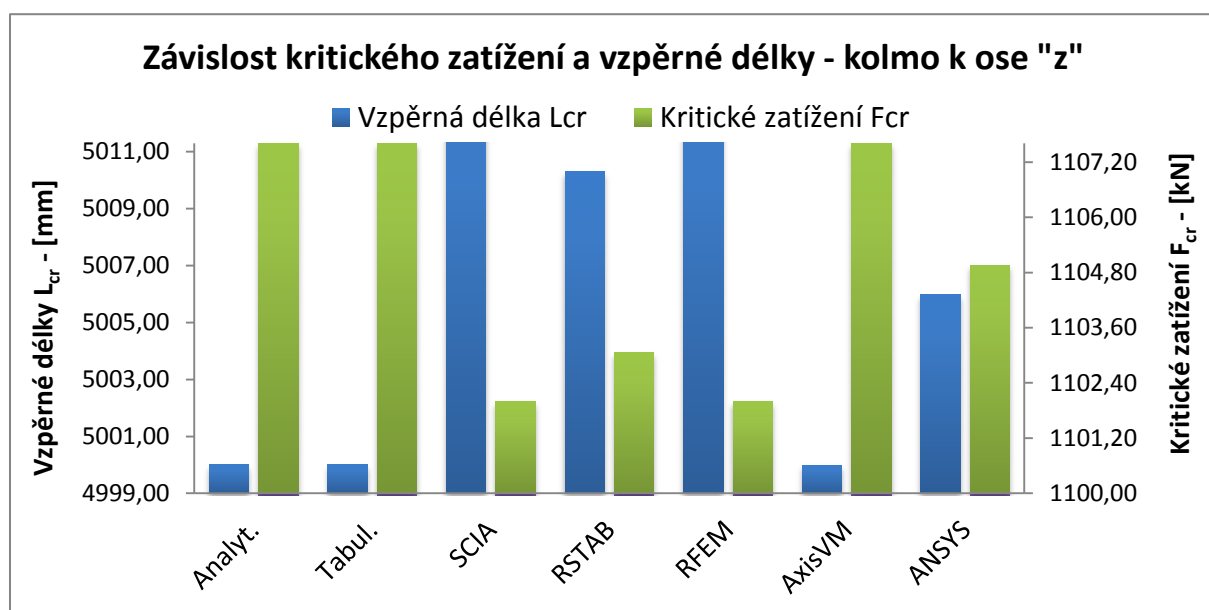
V případě oboustranně kloubově uloženého prutu jsou hodnoty totožné jako u analytického řešení, protože hodnota součinitele β je rovna 1 u obou řešení.

$$F_{cr,z} = \mathbf{1107,61 \text{ kN}} \quad (2.5)$$

$$F_{cr,y} = \mathbf{3060,84 \text{ kN}}$$

Výsledné srovnání pro vybočení prutu kolmo k ose „z“

Způsob výpočtu	Součinitel vzpěrné délky β	Vzpěrná délka L_{cr}	Kritické zatížení F_{cr}	Procentuální srovnání
	[-]	[mm]	[kN]	[%]
Analytické řešení	1,00000	5000,00	1107,61	100,00
Tabulkové řešení	1,00000	5000,00	1107,61	100,00
Software SCIA	1,00254	5012,72	1101,99	99,49
Software Dlubal - RSTAB	1,00206	5010,29	1103,06	99,59
Software Dlubal - RFEM	1,00254	5012,71	1102,00	99,49
Software AXIS VM	1,00000	4999,99	1107,61	100,00
Software ANSYS	1,00120	5005,98	1104,96	99,76

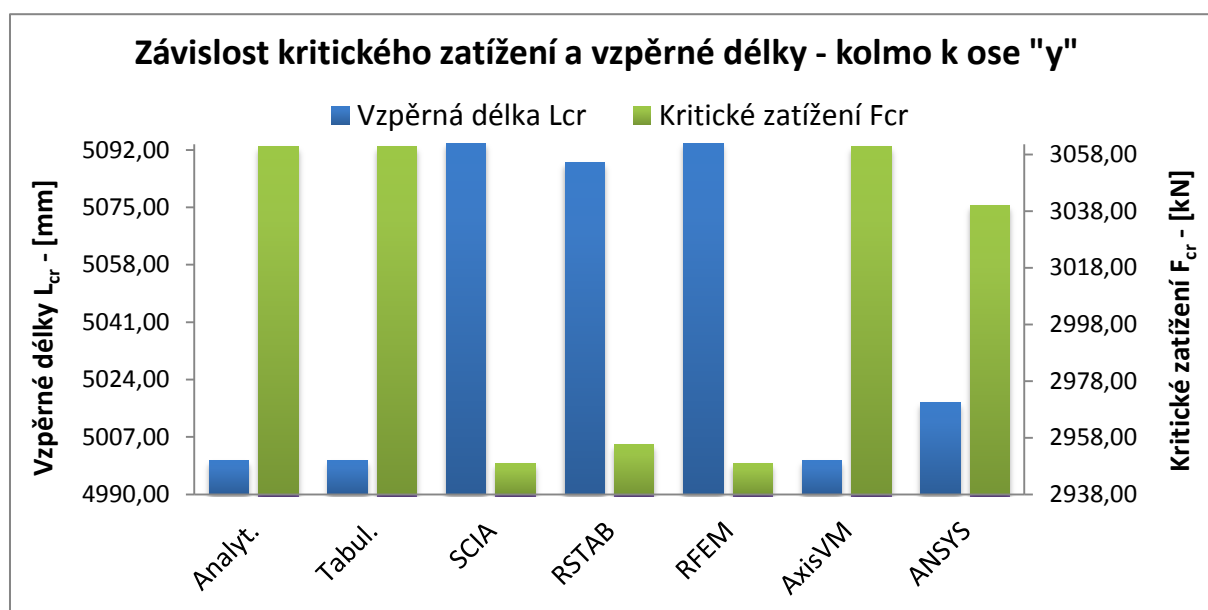


V tabulce a grafu je možné si všimnout vzájemné závislosti vzpěrné délky na kritickém zatížení – se zvětšující se délkou se zmenšuje zatížení a naopak.

Rozdíly mezi jednotlivými řešeními jsou poměrně malé (vzhledem k velikosti sil), pohybující se v rámci 0,5% (5,62 kN).

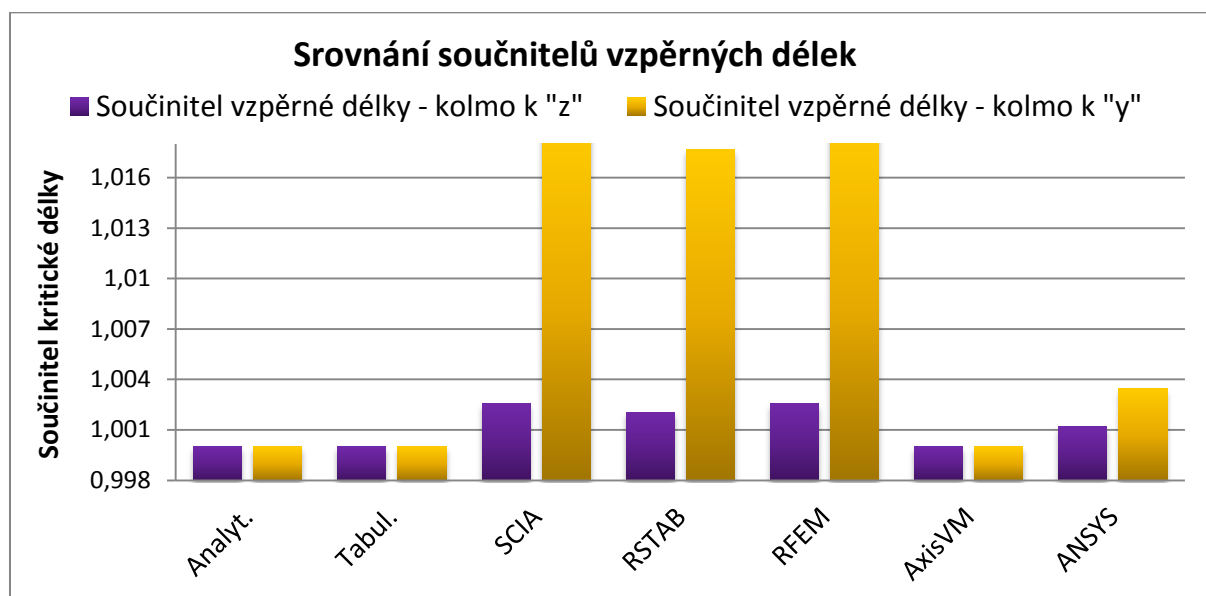
Výsledné srovnání pro vybočení prutu kolmo na osu „y“

Způsob výpočtu	Součinitel vzpěrné délky β	Vzpěrná délka L_{cr}	Kritické zatížení F_{cr}	Procentuální srovnání
	[-]	[mm]	[kN]	[%]
Analytické řešení	1,00000	5000,00	3060,84	100,00
Tabulkové řešení	1,00000	5000,00	3060,84	100,00
Software SCIA	1,01881	5094,03	2948,88	96,34
Software Dlubal - RSTAB	1,01764	5088,21	2955,63	96,56
Software Dlubal - RFEM	1,01881	5094,04	2948,87	96,34
Software AXIS VM	1,00000	5000,00	3060,84	100,00
Software ANSYS	1,00344	5017,19	3039,90	99,32

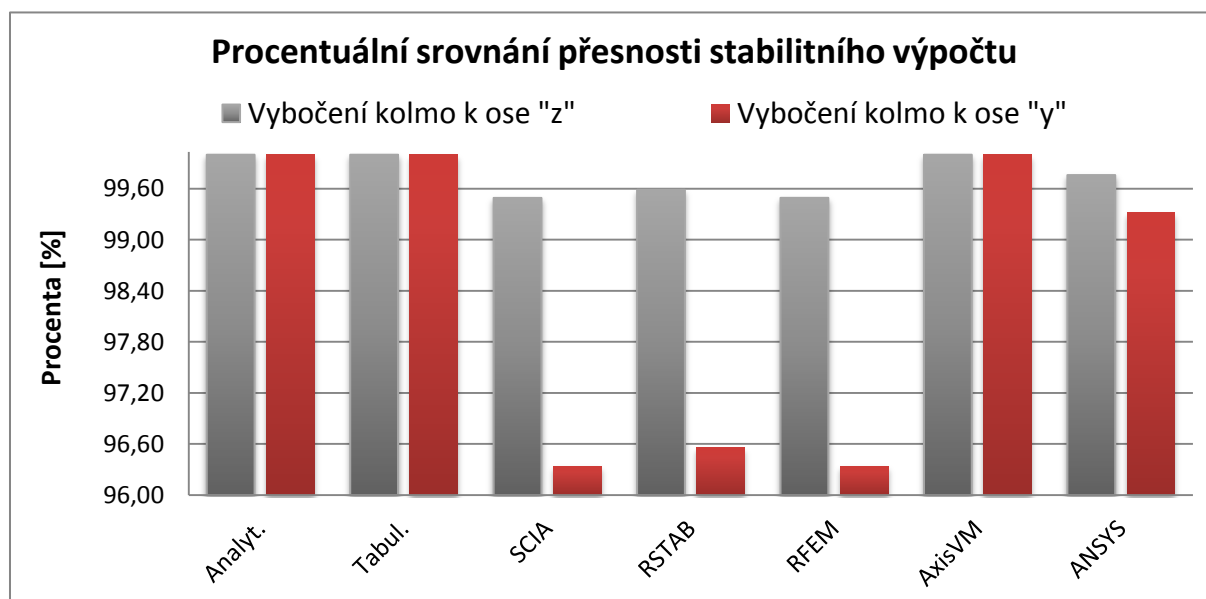


Stejně jako při vybočení kolmo k ose „z“ je možné vidět závislost vzpěrné délky na kritickém zatížení, ale zároveň je zapotřebí si uvědomit, že vzpěrné délky jsou zhruba totožné oproti kritickému zatížení, které vzrostlo téměř trojnásobně.

Rozdíly mezi jednotlivými řešeními jsou již značně větší, přibližně 7x oproti řešení ve druhém směru, hodnoty se pohybují v rámci přibližně 3,5% (112 kN).

Výsledné srovnání pro kloubově uložený přímý prut

Zde, na součiniteli vzpěrných délek, je možné vidět, že vzpěrné délky pro vybočení kolmo k ose „z“ jsou ve všech řešeních přibližně srovnatelné, oproti tomu kritické délky pro vybočení kolmo k ose „y“ jsou v některých softwarových řešeních značně odlišné.

Závěr:

V závěrečném srovnání můžeme vidět přehledné procentuální srovnání mezi jednotlivými řešeními, z něhož jsou patrné především rozdíly mezi u nás nejpoužívanějšími softwary (SCIA, RSTAB, RFEM) a ostatními řešeními.

2.2 Jednostranně vetknutý prut s proměnným průřezem

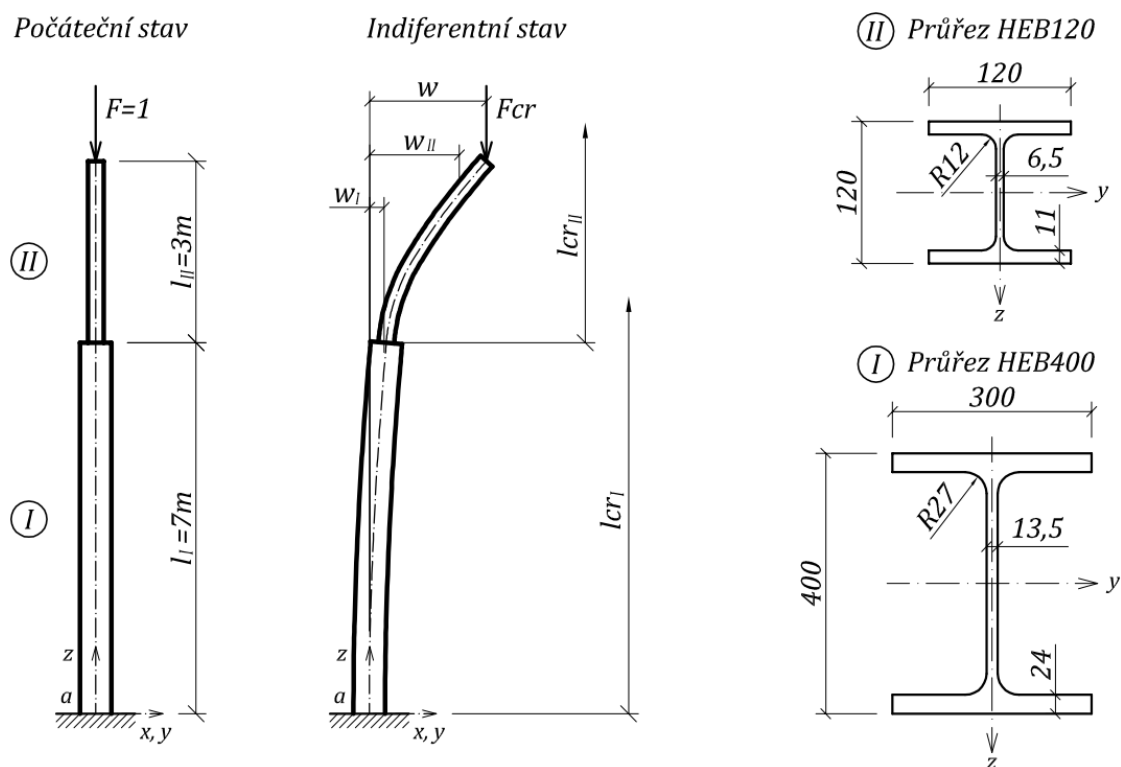
Jedná se o jednostranně vetknutou soustavu dvou prutů o proměnném průřezu namáhanou osovou tlakovou silou. Pruty jsou mezi sebou pevně spojeny.

Délka prutů: $l_I = 7m$
 $l_{II} = 3m$

Průřezy prutů: Prut I: **Válcovaný profil HEB400**
 $I_y = 5,768 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$
 $I_z = 1,082 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$

Prut II: **Válcovaný profil HEB120**
 $I_y = 8,644 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$
 $I_z = 3,175 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$

Zatížení: **Tlaková síla na konci prutů $F = 1 \text{ kN}$**



Obr. 2.2 – Jednostranně vetknutý prut s proměnným průřezem

Analytické řešení dle: Pružnost a plasticita I ^[1]

Řešení bude rozděleno do dvou intervalů, které odpovídají délce jednotlivých prutů. Kritické hodnoty pro celkovou sestavu získáme za pomoci podmínek nulových deformací ve vetknutí, celkového průhybu na konci soustavy a spojitosti průhybů na rozhraní intervalů.

Obecné odvození vzorců

Spodní část konzoly – prut I – průhyb w_I .

Horní část konzoly – prut II – průhyb w_{II} .

– zavedení substitucí

$$\alpha_I^2 = \frac{F}{E \cdot I_I} ; \quad \alpha_{II}^2 = \frac{F}{E \cdot I_{II}} \quad (2.6)$$

Řešení prvního intervalu - prut I

– diferenciální rovnice ohybové čáry

$$w''_I + \alpha_I^2 \cdot w_I = \alpha_I^2 \cdot w \quad (2.7)$$

– obecné řešení rovnice

$$w_I = C_1 \cdot \sin(\alpha_I \cdot x) + C_2 \cdot \cos(\alpha_I \cdot x) + w \quad (2.8)$$

$$w'_I = \alpha_I \cdot C_1 \cdot \cos(\alpha_I \cdot x) - \alpha_I \cdot C_2 \cdot \sin(\alpha_I \cdot x)$$

– okrajová podmínka ve vetknutí $x = 0$

$$w_I(0) = 0 ; \quad C_2 + w = 0 \rightarrow C_2 = -w \quad (2.9)$$

$$w'_I(0) = 0 ; \quad C_1 = 0$$

– průhyb a jeho derivace

$$w_I = w \cdot (1 - \cos(\alpha_I \cdot x)) \quad (2.10)$$

$$w'_I = w \cdot \alpha_I \cdot \sin(\alpha_I \cdot x)$$

Řešení druhého intervalu - prut II

Diferenciální rovnice ohybové čáry i obecné řešení rovnice – analogicky jako u prutu I pouze se záměnou indexů.

Okrajové podmínky: - na volném konci $w_{II} = w$

- spojitost průhybů na rozhraní intervalů $w_I(l_I) = w_{II}(l_{II})$

$$D_1 \cdot \sin(\alpha_{II} \cdot l) + D_2 \cdot \cos(\alpha_{II} \cdot l) + w = w \quad (2.11)$$

$$D_1 \cdot \sin(\alpha_{II} \cdot l_I) + D_2 \cdot \cos(\alpha_{II} \cdot l_I) + w = w \cdot (1 - \cos(\alpha_I \cdot l_I))$$

– řešení rovnic

$$D_2 = -D_1 \cdot \operatorname{tg}(\alpha_{II} \cdot l)$$

$$D_1 = w \cdot \frac{\cos(\alpha_I \cdot l_I) \cdot \cos(\alpha_{II} \cdot l)}{\sin(\alpha_{II} \cdot l_{II})} \quad (2.12)$$

– podmínka spojitosti první derivace na hranici intervalů (společná tečna)

$$w \cdot \alpha_I \cdot \sin(\alpha_I \cdot l_I) = \alpha_{II} \cdot D_1 \cdot \cos(\alpha_{II} \cdot l_I) - \alpha_{II} \cdot D_2 \cdot \sin(\alpha_{II} \cdot l_I) \quad (2.13)$$

– dosazení konstant a úpravou rovnice získáme stabilitní podmínku

$$\operatorname{tg}(\alpha_I \cdot l_I) \cdot \operatorname{tg}(\alpha_{II} \cdot l_{II}) = \frac{\alpha_I}{\alpha_{II}} \quad (2.14)$$

Řešení pro vybočení kolmo k ose „z“

– poměr tuhostí a délek

$$I_{II,z} = \frac{I_{II,z}}{I_{I,z}} \cdot I_{I,z}$$

$$I_{II,z} = \frac{3,175 \cdot 10^6}{1,082 \cdot 10^8} \cdot I_{I,z} = 0,0293 \cdot I_{I,z} \quad (2.15)$$

$$l_{II} = \frac{l_{II}}{l_I} \cdot l_I$$

$$l_{II} = \frac{3000}{7000} \cdot l_I = \frac{3}{7} \cdot l_I \quad (2.16)$$

– řešení stabilitní podmínky

$$\frac{\alpha_{II}}{\alpha_I} = \sqrt{\frac{\frac{F}{E \cdot I_{II,z}}}{\frac{F}{E \cdot I_{I,z}}}} = \sqrt{\frac{I_{I,z}}{I_{II,z}}}$$

$$\frac{\alpha_{II}}{\alpha_I} = \sqrt{\frac{I_{I,z}}{0,0293 \cdot I_{I,z}}} = 5,8421 \quad (2.17)$$

$$\operatorname{tg}(\alpha_I \cdot l_I) \cdot \operatorname{tg}\left(\alpha_I \cdot \left(\frac{3}{7} \cdot 5,8421\right) \cdot l_I\right) = 5,8421$$

$$\alpha_I \cdot l_I = 0,5825 \quad \rightarrow \quad \alpha_I = \frac{0,5802}{l_I} = \frac{0,5802}{0,7 \cdot l} = 0,8289 \cdot l$$

– zpětná substituce

$$\alpha_I^2 = \frac{F}{E \cdot I_I} = (0,8289 \cdot l)^2 = 0,6870 \cdot l^2 \quad (2.18)$$

– úprava na **Eulerovu kritickou sílu**

$$F = F_{cr,z} = 0,687 \cdot \frac{E \cdot I_{I,z}}{l^2} \quad (2.19)$$

$$F_{cr,z} = 0,687 \cdot \frac{(21 \cdot 10^4) \cdot (1,082 \cdot 10^8)}{10000^2} = \mathbf{156,10 \text{ kN}}$$

– **vzpěrnou délku** prutů získáme dosazením do obecné rovnice Eulerovi kritické síly

$$F_{cr} = \pi^2 \cdot \frac{E \cdot I}{l_{cr}^2} \rightarrow l_{cr} = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{F_{cr}}} \quad (2.20)$$

$$l_{cr,I,z} = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot (21 \cdot 10^4) \cdot (1,082 \cdot 10^8)}{156,10 \cdot 10^3}} = \mathbf{37902,84 \text{ mm}}$$

$$l_{cr,II,z} = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot (21 \cdot 10^4) \cdot (3,175 \cdot 10^6)}{156,10 \cdot 10^3}} = \mathbf{6492,77 \text{ mm}}$$

Řešení pro vybočení kolmo k ose „y“

– poměr tuhostí a délek

$$I_{II,y} = \frac{I_{II,y}}{I_{I,y}} \cdot I_{I,y} \quad (2.21)$$

$$I_{II,y} = \frac{8,644 \cdot 10^6}{5,768 \cdot 10^8} \cdot I_{I,y} = 0,0150 \cdot I_{I,y}$$

$$l_{II} = \frac{l_{II}}{l_I} \cdot l_I \quad (2.22)$$

$$l_{II} = \frac{3000}{7000} \cdot l_I = \frac{3}{7} \cdot l_I$$

– řešení stabilitní podmínky

$$\frac{\alpha_{II}}{\alpha_I} = \sqrt{\frac{\frac{F}{E \cdot I_{II,y}}}{\frac{F}{E \cdot I_{I,y}}}} = \sqrt{\frac{I_{I,y}}{I_{II,y}}}$$

$$\frac{\alpha_{II}}{\alpha_I} = \sqrt{\frac{I_{I,y}}{0,015 \cdot I_{I,y}}} = 8,1650 \quad (2.23)$$

$$tg(\alpha_I l_I) \cdot tg\left(\alpha_I \cdot \left(\frac{3}{7} \cdot 8,165\right) \cdot l_I\right) = 8,165$$

$$\alpha_I \cdot l_I = 0,4327$$

$$\alpha_I = \frac{0,4327}{l_I} = \frac{0,4327}{0,7 \cdot l} = 0,6181 \cdot l$$

– zpětná substituce

$$\alpha_I^2 = \frac{F}{E \cdot I_I} = (0,6181 \cdot l)^2 = 0,3821 \cdot l^2 \quad (2.24)$$

– úprava na **Eulerovu kritickou sílu**

$$F = F_{cr,y} = 0,3821 \cdot \frac{E \cdot I_{I,y}}{l^2} \quad (2.25)$$

$$F_{cr,y} = 0,3821 \cdot \frac{(21 \cdot 10^4) \cdot (5,768 \cdot 10^8)}{10000^2} = \mathbf{462,83 \text{ kN}}$$

– **vzpěrnou délka** prutů získáme dosazením do obecné rovnice Eulerovi kritické síly

$$F_{cr} = \pi^2 \cdot \frac{E \cdot I}{l_{cr}^2} \rightarrow l_{cr} = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{F_{cr}}}$$

$$l_{cr,I,y} = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot (21 \cdot 10^4) \cdot (5,768 \cdot 10^8)}{462,83 \cdot 10^3}} = \mathbf{50823,13 \text{ mm}} \quad (2.26)$$

$$l_{cr,II,y} = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot (21 \cdot 10^4) \cdot (8,644 \cdot 10^6)}{156,10 \cdot 10^3}} = \mathbf{6221,66 \text{ mm}}$$

Tabulkové řešení dle: Stabilita prutových konstrukcí ^[9]

Tímto řešením bude zjištěna pouze vzpěrná délka a kritická síla bude poté vypočtena z obecné rovnice Eulerovi kritické síly.

Řešení pro vybočení kolmo k ose „z“

– vzpěrná délka – prut I

$$l_{cr,I,z} = \beta_I \cdot l_I \quad (2.27)$$

– součinitel β_I odečten z tabulky (ve zdrojové literatuře označen jako ν)

– vstupní hodnoty κ a χ pro odečet součinitele z tabulky (zohledňující závislost délek, tuhostí a zatížení na jednotlivých prutech)

$$\kappa = \frac{I_{II,z} \cdot l_{II}}{I_{I,z} \cdot l_I} \quad (2.28)$$

$$\kappa = \frac{(3,175 \cdot 10^6) \cdot 7000}{(1,082 \cdot 10^8) \cdot 3000} = 0,0685$$

$$\chi = \frac{l_{II,z}}{l_{I,z}} \cdot \sqrt{\frac{N_2}{N_1} \cdot \frac{I_{II,z}}{I_{I,z}}} \quad (2.29)$$

$$\chi = \frac{3000}{7000} \cdot \sqrt{1 \cdot \frac{1,082 \cdot 10^8}{3,175 \cdot 10^6}} = 2,5019$$

– součinitel β_I - výřez části tabulky (mezilehlé hodnoty vypočteny lineární interpolací)

κ	χ		
	2,5	2,5019	3,0
0,0	5,00	5,0380	6,00
0,0685	5,3768	5,4174	6,4453
0,1	5,55	5,5918	6,65

– vzpěrná délka – prut I

$$l_{cr,I,z} = \beta_I \cdot l_I \quad (2.30)$$

$$l_{cr,I,z} = 5,4174 \cdot 7000 = \mathbf{37921,80 \text{ mm}}$$

– vzpěrná délka – prut 2

$$l_{cr,II,z} = \beta_{II} \cdot l_{II} \quad (2.31)$$

– součinitel β_{II} vypočten ze vzorce

$$\beta_{II} = \frac{\beta_I}{\chi} \leq 3 \quad (2.32)$$

$$\beta_{II} = \frac{5,4174}{2,5019} = 2,1653 < 3 \dots \text{vyhovuje}$$

– vzpěrná délka – prut 2

$$l_{cr,II,z} = \beta_{II} \cdot l_{II} \quad (2.33)$$

$$l_{cr,II,z} = 2,1653 \cdot 3000 = \mathbf{6495,90 \text{ mm}}$$

– kritická síla – oba pruty

$$F_{cr} = \pi^2 \cdot \frac{E \cdot I}{l_{cr}^2}$$

$$F_{cr,I,z} = \pi^2 \cdot \frac{(21 \cdot 10^4) \cdot (1,082 \cdot 10^8)}{37921,8^2} = \mathbf{155,95 \text{ kN}} \quad (2.34)$$

$$F_{cr,II,z} = \pi^2 \cdot \frac{(21 \cdot 10^4) \cdot (3,175 \cdot 10^6)}{6495,9^2} = \mathbf{155,94 \text{ kN}}$$

Pozn.: Jak je možné si všimnout výše, u tohoto řešení je možné kritickou sílu počítat přes libovolný prut soustavy – nepřesnost řešení je zapříčiněna zaokrouhlováním během výpočtu.

Řešení pro vybočení kolmo k ose „y“

– vzpěrná délka – prut I

$$l_{cr,I,y} = \beta_I \cdot l_I \quad (2.35)$$

– součinitel β_I odečten z tabulky (mezilehlé hodnoty vypočteny lineární interpolací)

– vstupní hodnoty κ a χ pro odečet součinitele z tabulky (zohledňující závislost délek, tuhostí a zatížení na jednotlivých prutech)

$$\kappa = \frac{I_{II,y} \cdot l_{II}}{I_{I,y} \cdot l_I} \quad (2.36)$$

$$\kappa = \frac{(8,644 \cdot 10^6) \cdot 7000}{(5,768 \cdot 10^8) \cdot 3000} = 0,0350$$

$$\chi = \frac{l_{II,y}}{l_{I,y}} \cdot \sqrt{\frac{N_2}{N_1} \cdot \frac{I_{I,y}}{I_{II,y}}} \quad (2.37)$$

$$\chi = \frac{3000}{7000} \cdot \sqrt{1 \cdot \frac{5,768 \cdot 10^8}{8,644 \cdot 10^6}} = 3,5000$$

– součinitel β_I - výřez části tabulky (mezilehlé hodnoty vypočteny lineární interpolací)

κ	χ	
	3,0	3,5000
0,0	6,00	7,0000
0,0350	6,2275	7,2625
0,1	6,65	7,7500

– vzpěrná délka – prut I

$$l_{cr,I,y} = \beta_I \cdot l_I \quad (2.38)$$

$$l_{cr,I,y} = 7,2625 \cdot 7000 = \mathbf{50837,50 \text{ mm}}$$

– vzpěrná délka – prut II

$$l_{cr,II,y} = \beta_{II} \cdot l_{II} \quad (2.39)$$

– součinitel β_{II} vypočten ze vzorce

$$\beta_{II} = \frac{\beta_I}{\chi} \leq 3 \quad (2.40)$$

$$\beta_{II} = \frac{7,2625}{3,5000} = 2,0750 < 3 \dots \text{vyhovuje}$$

– vzpěrná délka – prut 2

$$l_{cr,II,y} = \beta_{II} \cdot l_{II} \quad (2.41)$$

$$l_{cr,II,y} = 2,075 \cdot 3000 = \mathbf{6225,00 \text{ mm}}$$

– kritická síla – oba pruty

$$F_{cr} = \pi^2 \cdot \frac{E \cdot I}{l_{cr}^2} \quad (2.42)$$

$$F_{cr,I,y} = \pi^2 \cdot \frac{(21 \cdot 10^4) \cdot (5,768 \cdot 10^8)}{50837,5^2} = \mathbf{462,57 \text{ kN}}$$

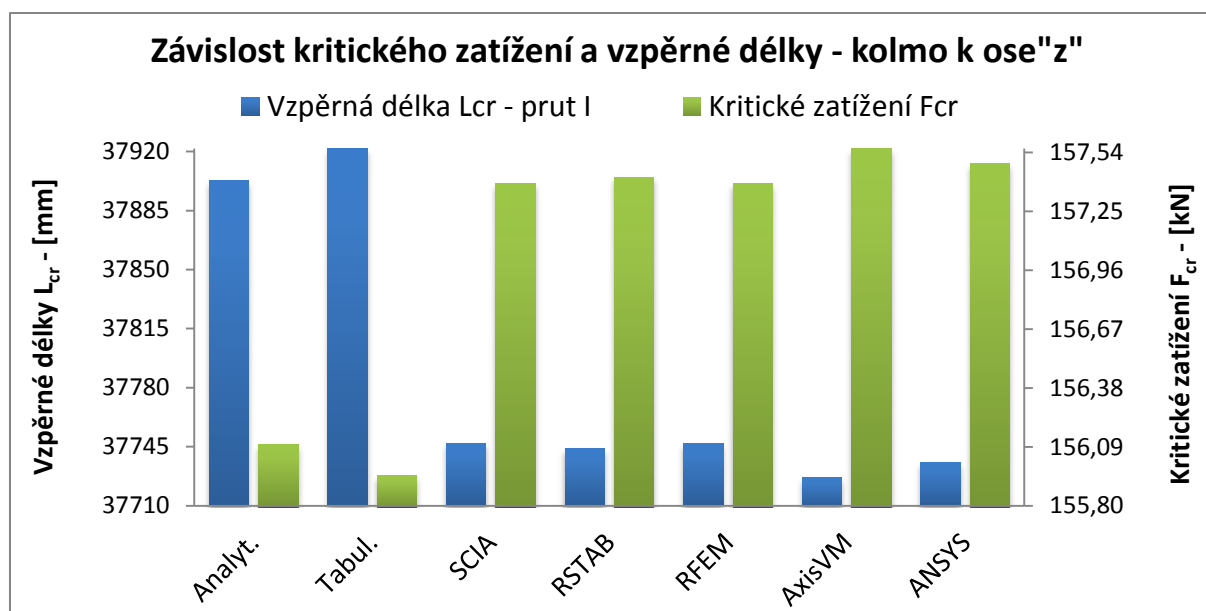
$$F_{cr,II,y} = \pi^2 \cdot \frac{(21 \cdot 10^4) \cdot (8,644 \cdot 10^6)}{6225,00^2} = \mathbf{462,55 \text{ kN}}$$

Výsledné srovnání pro vybočení prutu kolmo k ose „z“

Způsob výpočtu	Prut	Součinitel vzpěrné délky β	Vzpěrná délka L_{cr}	Kritické zatížení F_{cr}	Procentuální srovnání
		[-]	[mm]	[kN]	[%]
Analytické řešení	II	2,16426	6492,77	156,10	100,00
	I	5,41469	37902,84		
Tabulkové řešení	II	2,16530	6495,90	155,95	99,90
	I	5,41740	37921,80		
Software SCIA	II	2,15537	6466,11	157,39	100,83
	I	5,39246	37747,19		
Software Dlubal - RSTAB	II	2,15517	6465,52	157,42	100,85
	I	5,39197	37743,80		
Software Dlubal - RFEM	II	2,15535	6466,05	157,39	100,83
	I	5,39241	37746,90		
Software AXIS VM	II	2,15421	6462,62	157,56	100,94
	I	5,38955	37726,82		
Software ANSYS	II	2,15472	6464,16	157,49	100,89
	I	5,39083	37735,80		

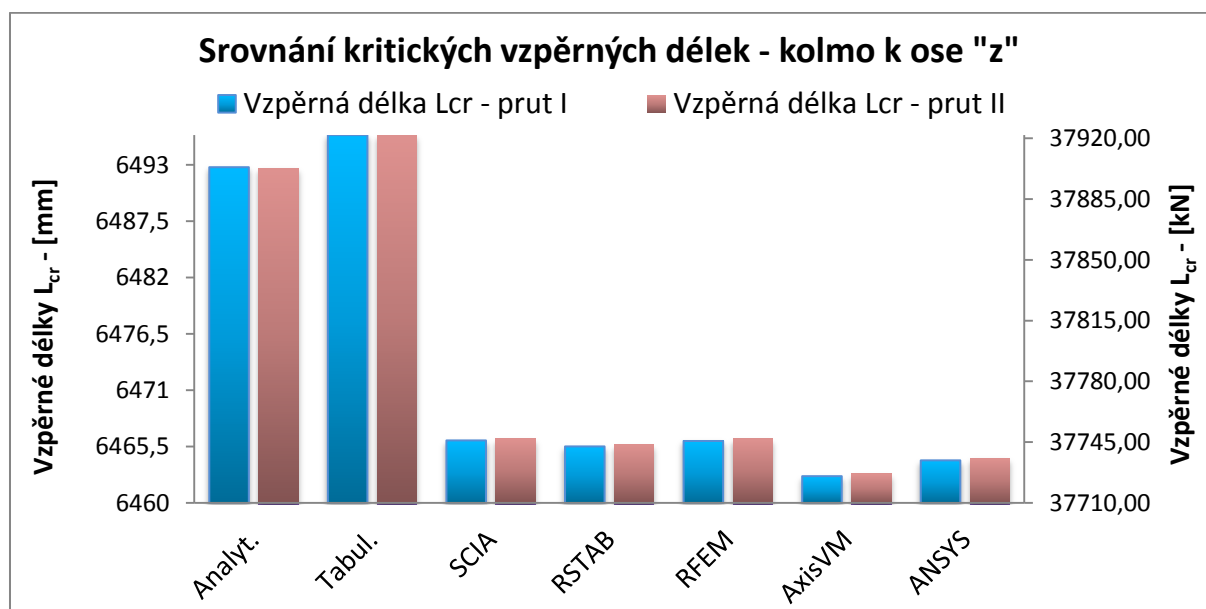
Z tabulky je zřejmé, že hodnoty kritického zatížení získané pomocí softwarů jsou ve všech případech vyšší než hodnoty vypočtené analytickým i tabulkovým řešením, což je přesně opačný případ než hodnoty na prostém nosníku (viz výše).

Rozdíly mezi jednotlivými řešeními se pohybují v rámci přibližně 1% (1,61 kN).



V grafu jsou názorně vidět již výše zmiňované rozdíly mezi softwarovými řešeními a početními řešeními, ale zároveň je možné si všimnout, že mezi sebou jsou jednotlivá softwarová řešení srovnatelná.

Závislost kritického zatížení a vzpěrné délky je pro oba pruty totožná, což je patrné z následujícího grafu, kde jsou znázorněny hodnoty kritických délek, které jsou pro oba pruty (relativně k jejich délce) srovnatelné.

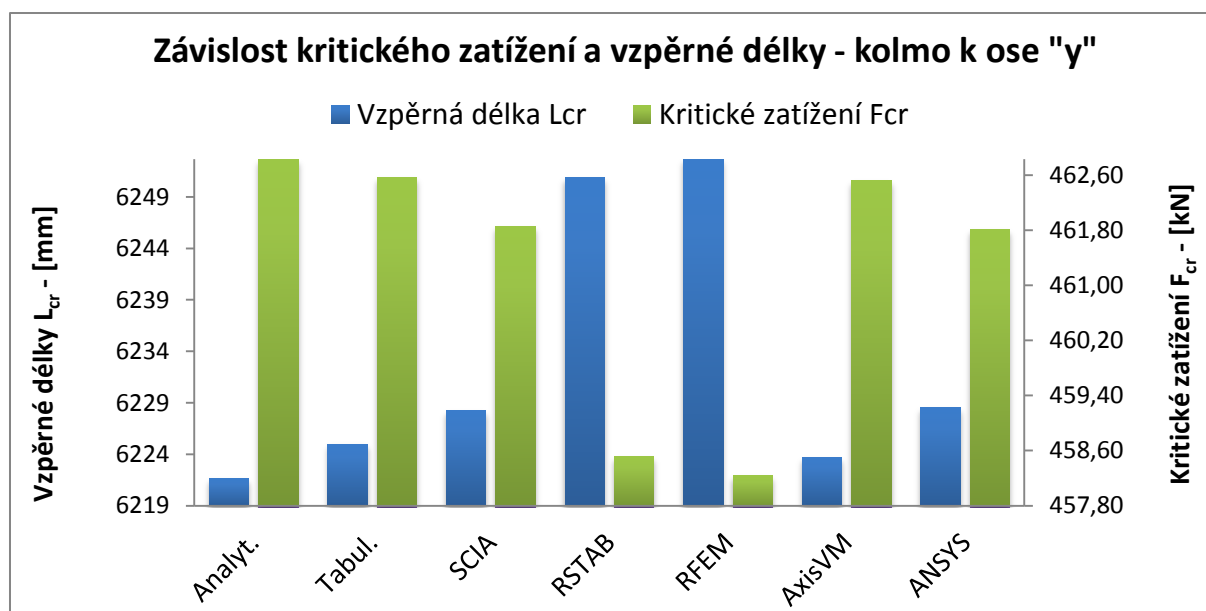


Výsledné srovnání pro vybočení prutu kolmo k ose „y“

Způsob výpočtu	Prut	Součinitel vzpěrné délky β	Vzpěrná délka L_{cr}	Kritické zatížení F_{cr}	Procentuální srovnání
		[-]	[mm]	[kN]	[%]
Analytické řešení	II	2,07389	6221,66	462,83	100,00
	I	7,26045	50823,13		
Tabulkové řešení	II	2,07500	6225,00	462,56	99,94
	I	7,26250	50837,50		
Software SCIA	II	2,07609	6228,26	461,85	99,79
	I	7,26815	50877,02		
Software Dlubal - RSTAB	II	2,08363	6250,88	458,51	99,07
	I	7,29454	51061,80		
Software Dlubal - RFEM	II	2,08425	6252,74	458,24	99,01
	I	7,29671	51077,00		
Software AXIS VM	II	2,07458	6223,74	462,52	99,93
	I	7,26288	50840,16		
Software ANSYS	II	2,07617	6228,51	461,812	99,78
	I	7,26844	50879,11		

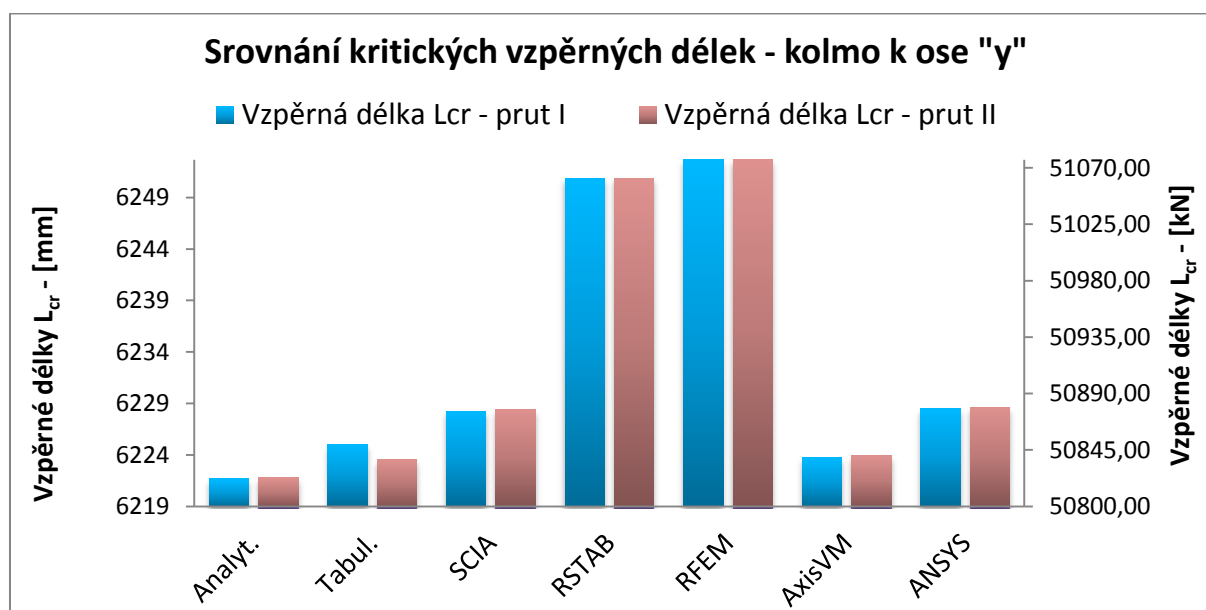
Z tabulky je zřejmé, že hodnoty kritického zatížení jsou značně odlišné oproti hodnotám při vybočení kolmo k ose „z“. Rozdíly jsou viditelné na velikosti sil, které jsou přibližně trojnásobné, ale především na hodnotách sil získaných ze softwarových řešení, které jsou v tomto případě nižší než hodnoty z analytického řešení.

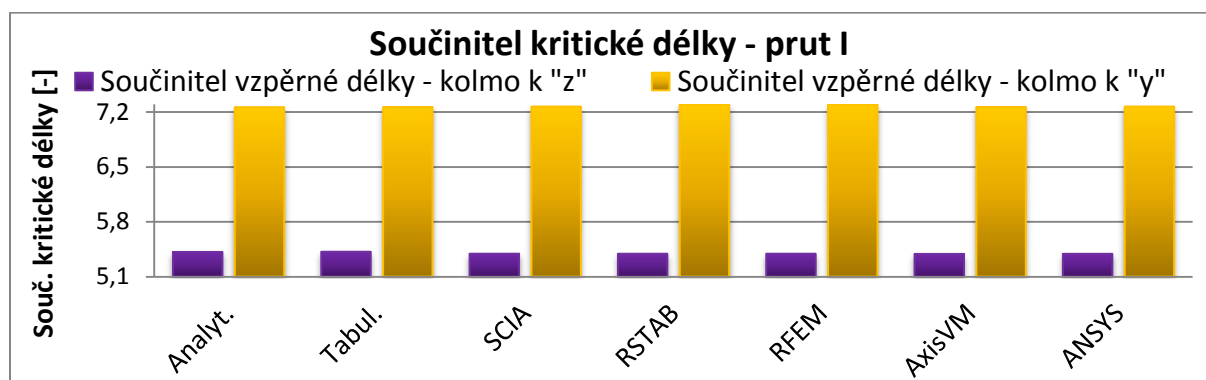
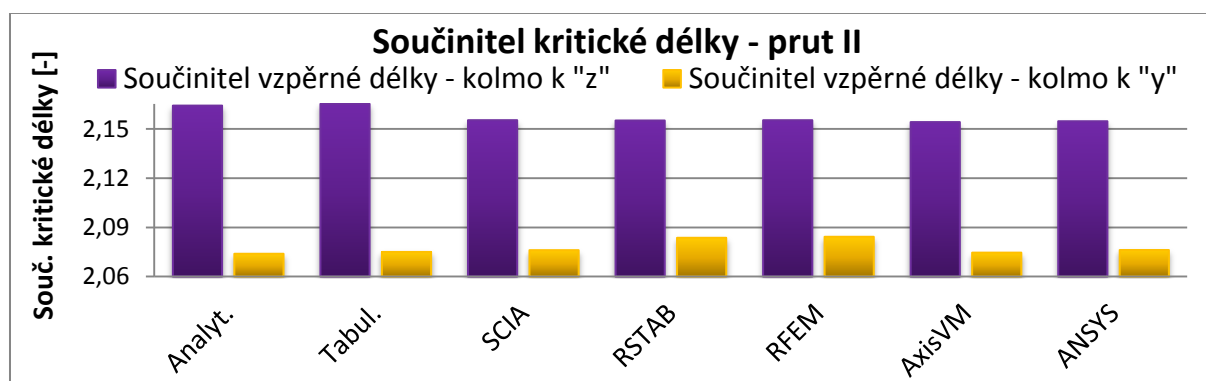
Rozdíly mezi jednotlivými řešení se pohybují v rámci přibližně 1% (5,59 kN), což je stejný rozdíl jako ve druhém směru, přestože tam byly hodnoty v opačném pořadí.



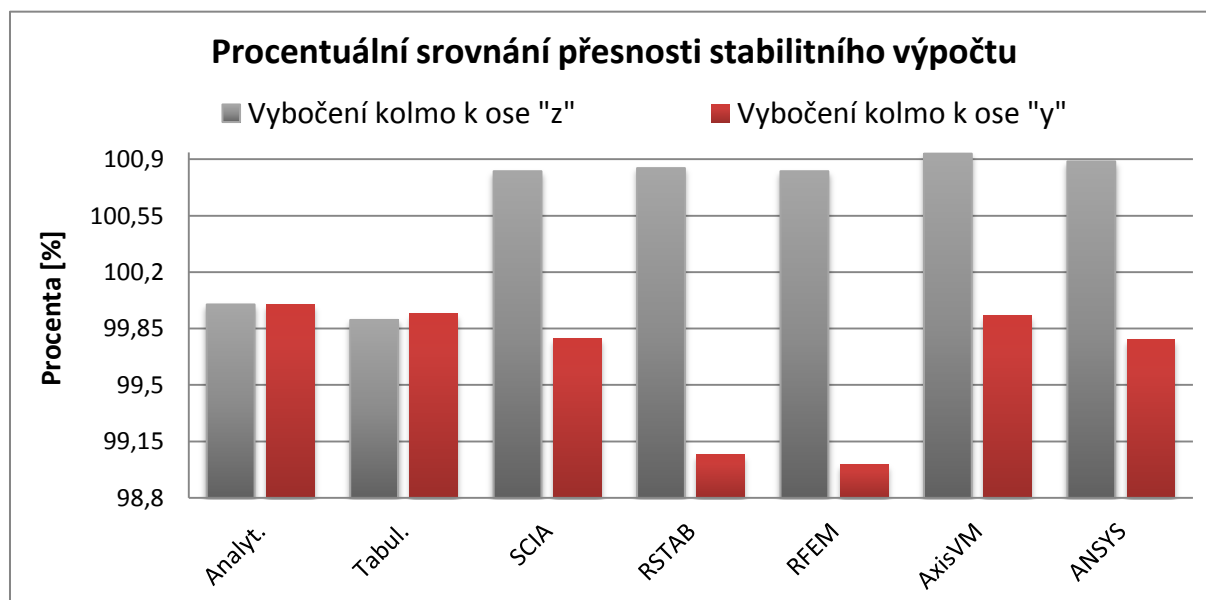
V grafu je možné vidět výraznou odlišnost dvou řešení (RSTAB, RFEM), přestože v druhém směru byly všechny softwary srovnatelné.

Stejně jako při vybočení kolmo k ose „z“ platí, že závislost kritického zatížení a vzpěrné délky je pro oba pruty totožná, což je patrné z následujícího grafu, kde jsou znázorněny hodnoty kritických délek, které jsou pro oba pruty (relativně k jejich délce) srovnatelné.



Výsledné srovnání pro jednostranně vetknutý prut s proměnným průřezem

Na součinitelích vzpěrných délek si můžeme všimnout, jak se mění vzpěrné délky v závislosti na směru vybočení konzoly, kdy vzájemné poměry vzpěrných délek obou prutů jsou se změnou směru vybočení vzájemně prohozeny.

Závěr:

V závěrečném srovnání můžeme vidět především rozdíly při vybočení v rozhodujícím směru (kolmo k ose „z“) a to mezi početními a softwarovými řešeními. Při vybočení kolmo k ose „y“ se od průměru výrazněji odlišuje software RSTAB a RFEM.

2.3 Rám

2.3.1 Kloubově uložený jednopodlažní rám – symetrické zatížení

Jedná se o jednopodlažní kloubově uložený rám o jednom poli, kde příčle a sloupy jsou spojeny tuhým přípojem (momentově tuhý rámový roh). Konstrukce je symetricky zatížena silami umístěnými v rozích rámu. Ztráta stability bude řešena pro tlačené sloupy a pouze v rovině rámu (vybočení sloupů kolmo k ose „z“).

Délka prutů: $h = 3\text{m}$
 $l = 6\text{m}$

Průřezy prutů: Prut I – sloup: **Válcovaný profil U200**

$$I_y = 1,910 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$$

$$I_z = 1,480 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

Pozn.: Tento průřez zvolen pouze z ukázkových důvodů, použití jednoose symetrického průřezu.

Průřez je osazen stojinou směrem do rámu.

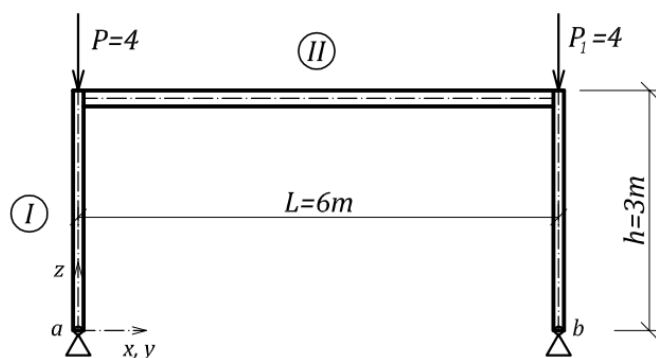
Prut II – příčel: **Válcovaný profil IPE200**

$$I_y = 1,943 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$$

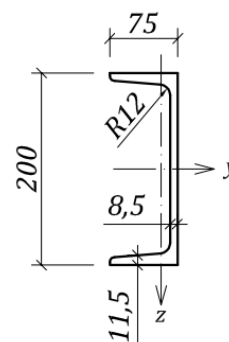
$$I_z = 1,424 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

Zatížení: **Tlaková síla v rozích rámu $P = P_1 = 4 \text{ kN}$**

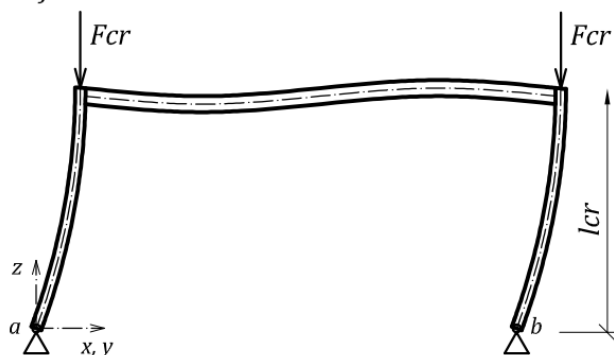
Počáteční stav



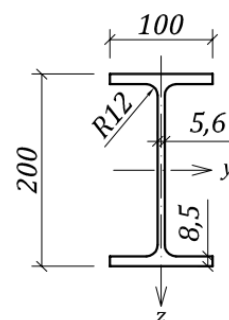
Ⓘ Průřez U200



Indiferentní stav



Ⓜ Průřez IPE200



Obr. 2.3 – Kloubově uložený jednopodlažní rám – symetrické zatížení

Tabulkové řešení dle studijní opory: Prvky kovových konstrukcí ^[6]

Tímto řešením bude zjištěna pouze vzpěrná délka a kritická síla bude poté vypočtena z obecné rovnice Eulerovi kritické síly.

– vzpěrná délka – sloup

$$l_{cr} = \beta \cdot h \quad (2.43)$$

– součinitel β vypočten dle vzorce z tabulek

$$\beta = 2 \cdot \beta_1 \cdot \sqrt{1 + 0,4 \cdot \kappa} \quad (2.44)$$

– členy β_1 a κ jsou dílčí součinitele zohledňující závislost délek, tuhostí a zatížení na jednotlivých prutech.

$$\kappa = \frac{I_I \cdot L}{I_{II} \cdot h} \quad (2.45)$$

$$\kappa = \frac{1,48 \cdot 10^6 \cdot 6000}{1,943 \cdot 10^7 \cdot 3000} = 0,1523$$

$$\beta_1 = 0,7 \cdot \sqrt{1 + \frac{P_1}{P}} \quad \text{pro } 0 \leq P_1 \leq P \quad (2.46)$$

$$\beta_1 = 0,7 \cdot \sqrt{1 + \frac{4}{4}} = 0,9899$$

– součinitel β

$$\beta = 2 \cdot \beta_1 \cdot \sqrt{1 + 0,4 \cdot \kappa} \quad (2.47)$$

$$\beta = 2 \cdot 0,9899 \cdot \sqrt{1 + 0,4 \cdot 0,1523} = 2,0393$$

– vzpěrná délka – sloup

$$l_{cr} = \beta \cdot h \quad (2.48)$$

$$l_{cr} = 2,039 \cdot 3000 = \mathbf{6117,99 \text{ mm}}$$

– kritická síla – sloup

$$F_{cr} = \pi^2 \cdot \frac{E \cdot I}{l_{cr}^2} \quad (2.49)$$

$$F_{cr} = \pi^2 \cdot \frac{(21 \cdot 10^4) \cdot (1,48 \cdot 10^6)}{6117^2} = \mathbf{81,95 \text{ kN}}$$

Tabulkové řešení dle publikace: Stabilita prutových konstrukcí

Tímto řešením bude zjištěna pouze vzpěrná délka a kritická síla bude poté vypočtena z obecné rovnice Eulerovi kritické síly.

– vzpěrná délka – sloup

$$l_{cr} = \beta \cdot h \quad (2.50)$$

– součinitel β odečten z grafu (ve zdrojové literatuře označen jako v)

– vstupní hodnoty p a χ pro odečet součinitele z grafu (zohledňující závislost délek, tuhostí a zatížení na jednotlivých prutech)

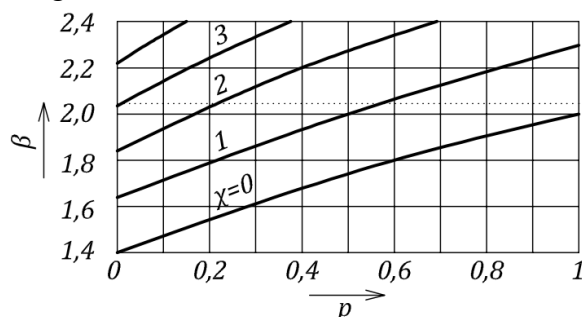
$$p = \frac{P_1}{P} \quad (2.51)$$

$$p = \frac{4}{4} = 1$$

$$\chi = \frac{I_I \cdot L}{I_{II} \cdot h} \quad (2.52)$$

$$\chi = \frac{1,48 \cdot 10^6 \cdot 6000}{1,943 \cdot 10^7 \cdot 3000} = 0,1523$$

– součinitel β – výřez části grafu



Obr. 2.4 – Graf součinitele β pro kloubově uložený rám

– vzpěrná délka – sloup

$$l_{cr} = \beta \cdot h \quad (2.53)$$

$$l_{cr} = 2,0452 \cdot 3000 = \mathbf{6126,00 \text{ mm}}$$

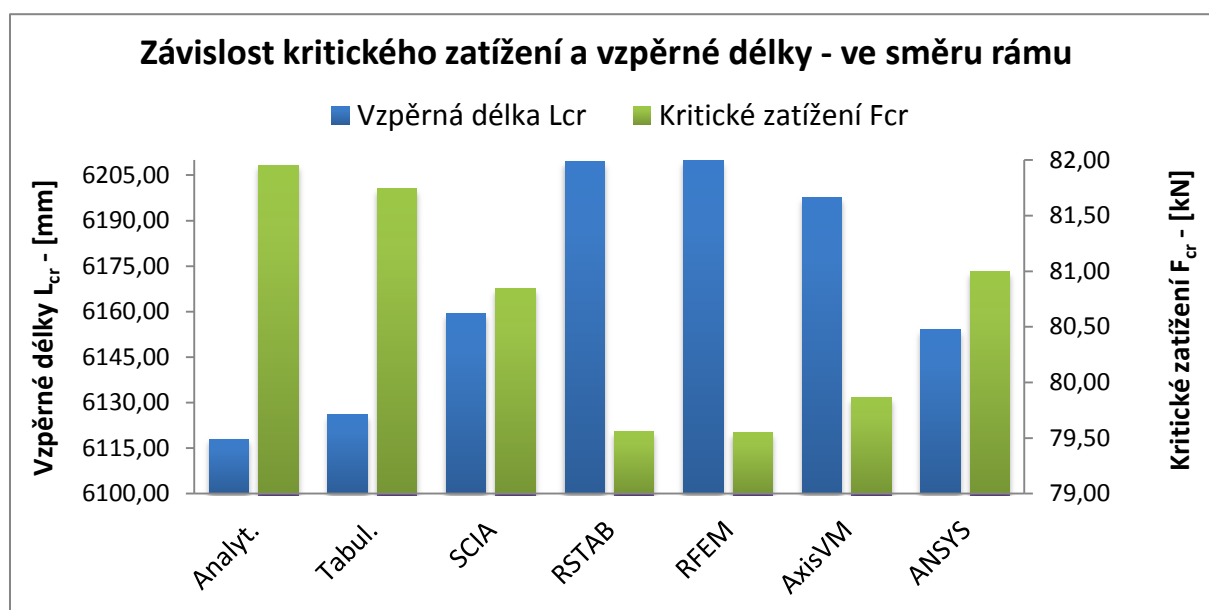
– kritická síla – sloup

$$F_{cr} = \pi^2 \cdot \frac{E \cdot I}{l_{cr}^2} \quad (2.54)$$

$$F_{cr} = \pi^2 \cdot \frac{(21 \cdot 10^4) \cdot (1,48 \cdot 10^6)}{6126^2} = \mathbf{81,74 \text{ kN}}$$

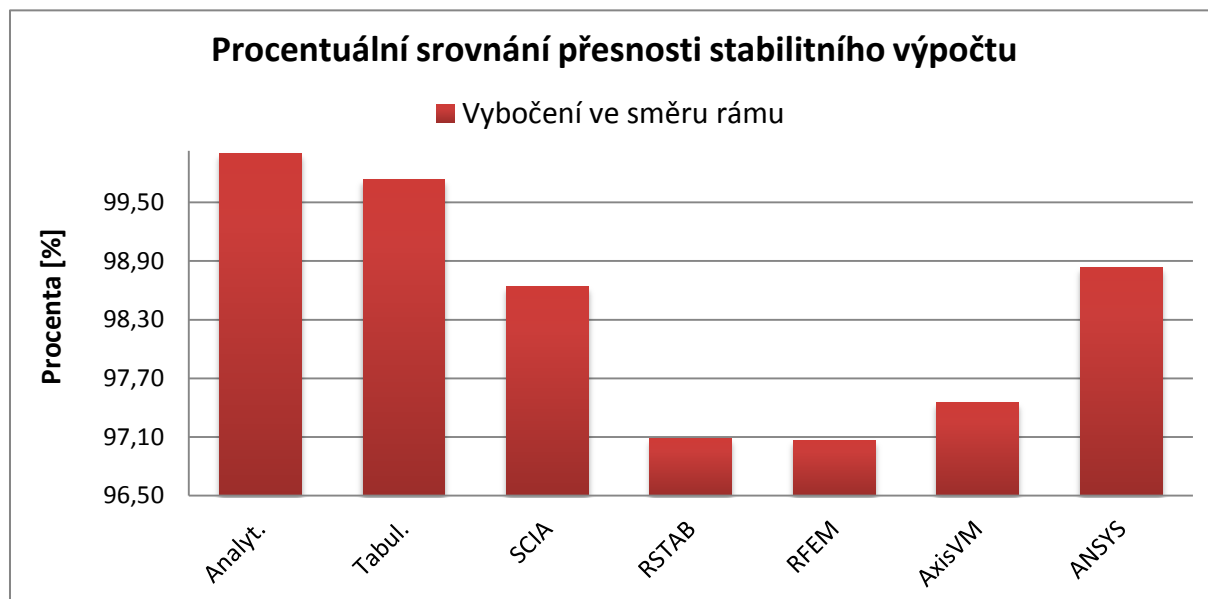
Výsledné srovnání pro vybočení ve směru rámu

Způsob výpočtu	Součinitel vzpěrné délky β	Vzpěrná délka L_{cr}	Kritické zatížení F_{cr}	Procentuální srovnání
	[-]	[mm]	[kN]	[%]
Analytické řešení	2,03933	6117,98	81,95	100,00
Tabulkové řešení	2,04200	6126,00	81,74	99,74
Software SCIA	2,05312	6159,36	80,84	98,64
Software Dlubal - RSTAB	2,06982	6209,45	79,56	97,08
Software Dlubal - RFEM	2,06992	6209,75	79,55	97,07
Software AXIS VM	2,06583	6197,48	79,86	97,45
Software ANSYS	2,05132	6153,95	81,00	98,83



V tabulce a grafu je možné si opět všimnout vzájemné závislosti vzpěrné délky na kritickém zatížení – se zvětšující se délkou se zmenšuje zatížení a naopak.

Rozdíly mezi jednotlivými řešeními jsou poměrně velké (vzhledem k velikosti kritické síly), pohybující se v rámci 2,93% (2,40 kN).

Výsledné srovnání pro kloubově uložený jednopodlažní rám – symetrické zatížení**Závěr:**

V závěrečném srovnání jsou vidět výrazné rozdíly mezi početními a softwarovými řešeními, ale zároveň ani softwarová řešení mezi sebou nejsou srovnatelná.

2.3.2 Kloubově uložený jednopodlažní rám – nesymetrické zatížení

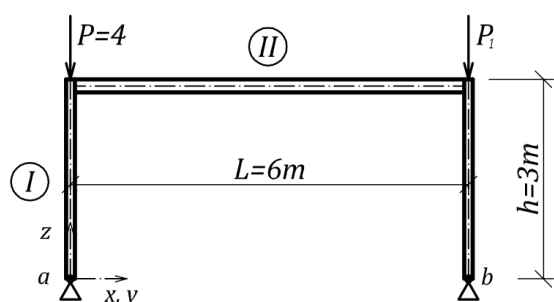
V reálných konstrukcích se často vyskytují i rámy, které jsou nesymetricky zatížené, proto jsem do své práce zařadil i stručné srovnání závislosti nesymetrie zatížení na vzpěr rámu.

Konstrukce je totožná jako rám v předchozí kapitole, pouze s různými poměry zatížení.

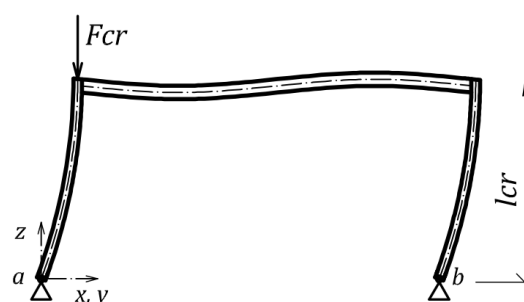
Tabulka zatěžovacích stavů:

Označení	Síla P [kN]	Síla P_1 [kN]
4:4	4	4
4:3	4	3
4:2	4	2
4:1	4	1
4:0	4	0

Počáteční stav



Indiferentní stav



Obr 2.5 - Kloubově uložený jednopodlažní rám – symetrické zatížení

Tabulkové řešení dle studijní opory: Prvky kovových konstrukcí

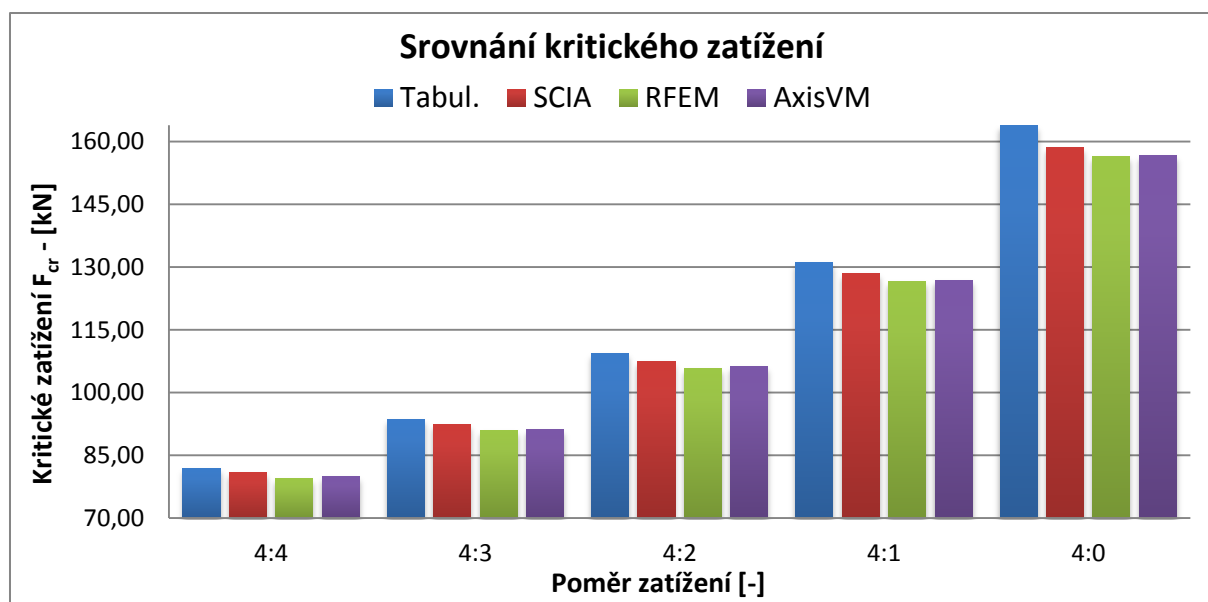
Řešeno totožným způsobem jako u rámu se symetrickým zatížením, výpočet se liší pouze v dílčím součiniteli β_I , kde je vzájemným poměrem zohledněna nesymetrie zatěžovacích sil v rozích rámu.

Softwarové řešení

V této kapitole se jedná především o určení závislosti poměru zatížení na kritických vzpěrných hodnotách, proto bylo zvoleno řešení pouze ve třech u nás nejpoužívanějších softwarech.

Výsledné srovnání pro vybočení ve směru rámu

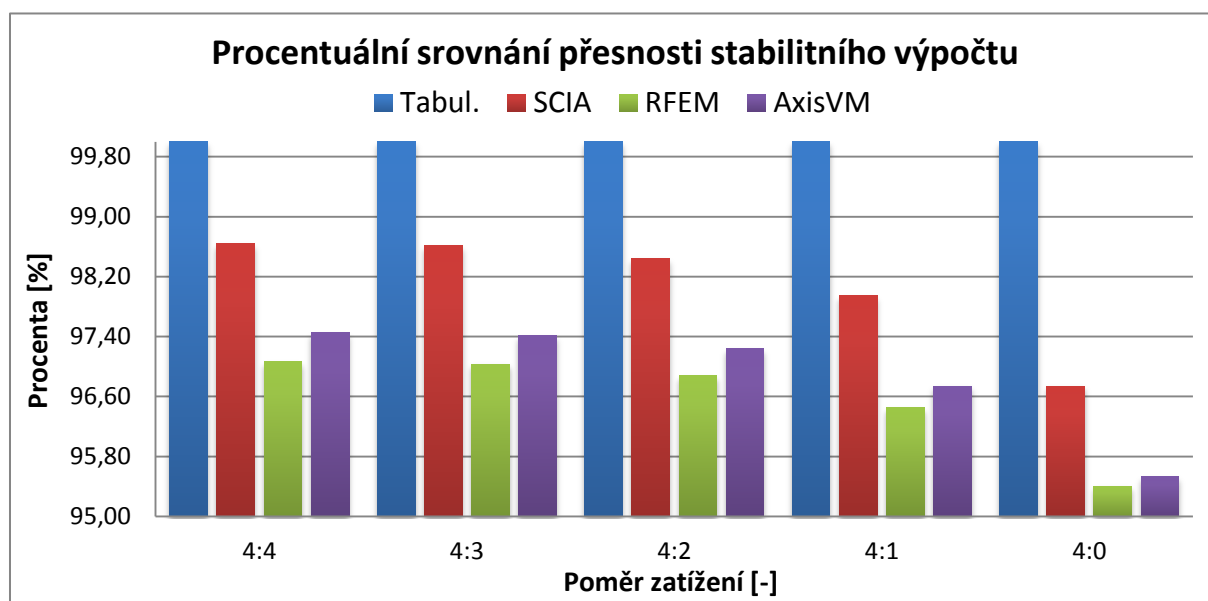
Zatěžovací stav	Tabulkové řešení	SCIA	RFEM	Axis
Součinitel vzpěrné délky β [-]				
4:4	2,03933	2,05312	2,06992	2,06583
4:3	1,90762	1,92091	1,93657	1,93280
4:2	1,76611	1,78004	1,79434	1,79105
4:1	1,61214	1,62897	1,64156	1,63910
4:0	1,44203	1,46616	1,47636	1,47535
Vzpěrná délka L_{cr} – [mm]				
4:4	6117,98	6159,36	6209,75	6197,48
4:3	5722,86	5762,74	5809,72	5798,39
4:2	5298,34	5340,11	5383,03	5373,16
4:1	4836,41	4886,92	4924,69	4917,31
4:0	4326,08	4398,49	4429,08	4426,05
Kritické zatížení F_{cr} - [kN]				
4:4	81,95	80,84	79,55	79,86
4:3	93,66	92,36	90,88	91,24
4:2	109,27	107,56	105,86	106,25
4:1	131,14	128,44	126,48	126,86
4:0	163,91	158,56	156,37	156,58
Procentuální srovnání – [%]				
4:4	100,00	98,64	97,07	97,45
4:3	100,00	98,61	97,03	97,41
4:2	100,00	98,44	96,88	97,23
4:1	100,00	97,94	96,45	96,74
4:0	100,00	96,74	95,40	95,53

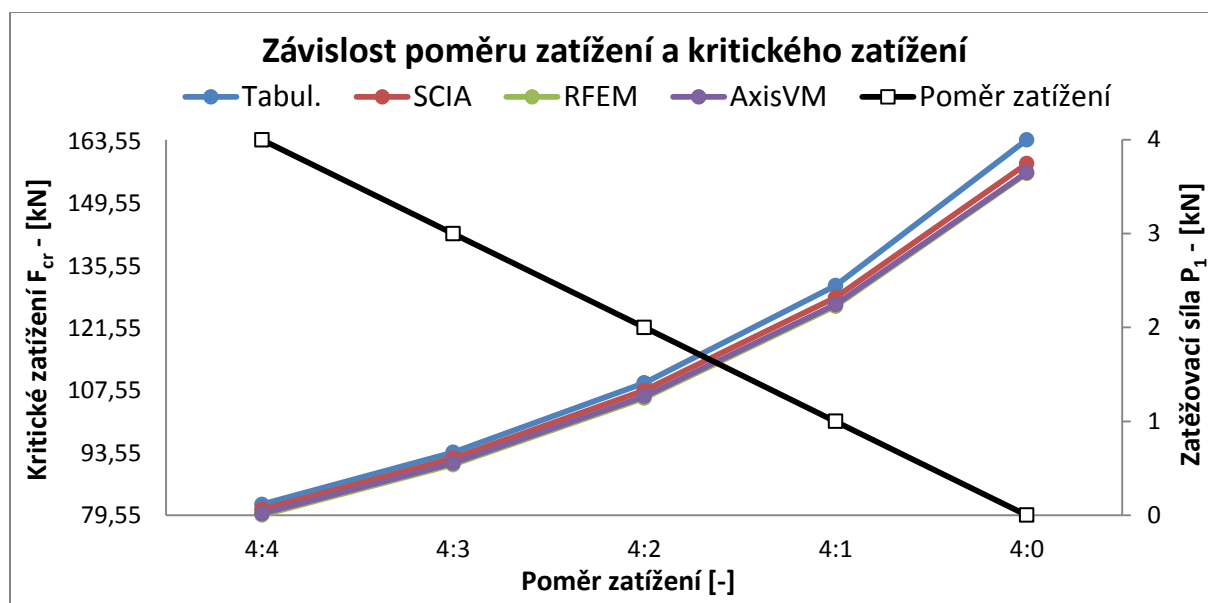


V grafu můžeme vidět, že kritické zatížení je přibližně srovnatelné v rámci jednotlivých zatěžovacích stavů, u kterých naopak hodnoty kritického zatížení rostou se zvyšujícím se poměrem zatěžovacích sil.

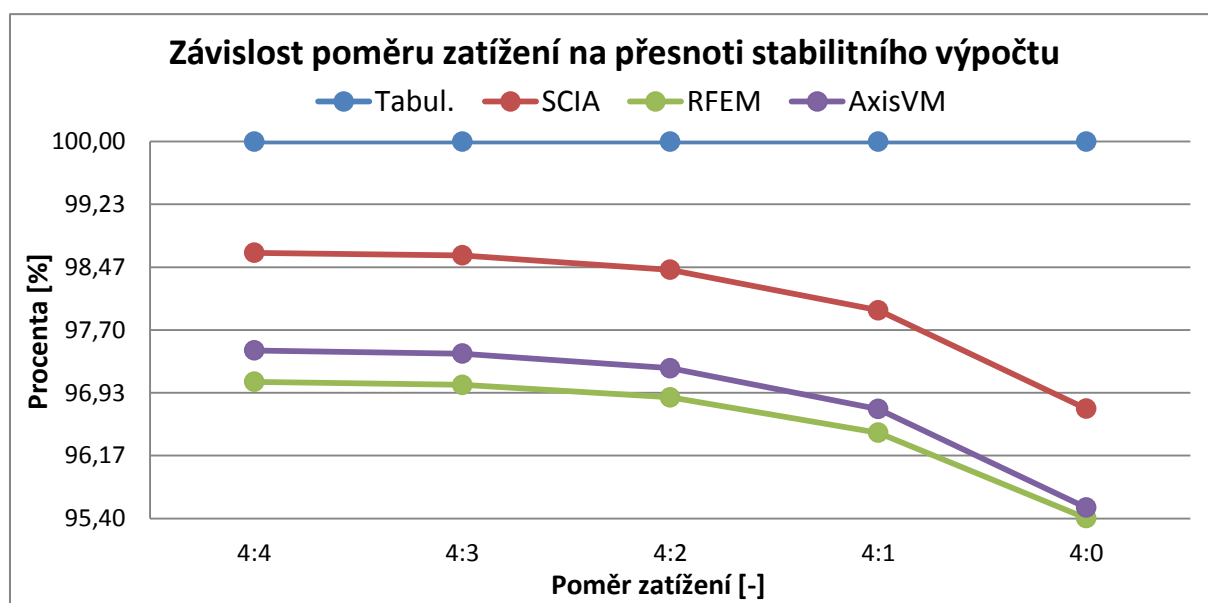
Rozdíly mezi jednotlivými řešeními se v rámci zatěžovacích stavů postupně zvětšují, což je názorně vidět v následující tabulce a grafu.

ZS	Rozdíl [%]	Rozdíl [kN]
4:4	2,93	2,40
4:3	2,97	2,78
4:2	3,12	3,41
4:1	3,55	4,66
4:0	4,60	7,54



Výsledné srovnání pro kloubově uložený jednopodlažní rám – nesymetrické zatížení

Graf znázorňující lineární změnu poměru zatěžovacích sil konstrukce a tomu odpovídající změnu kritického zatížení, která má nelineární průběh a je u všech zkoumaných řešení přibližně stejná.

Závěr:

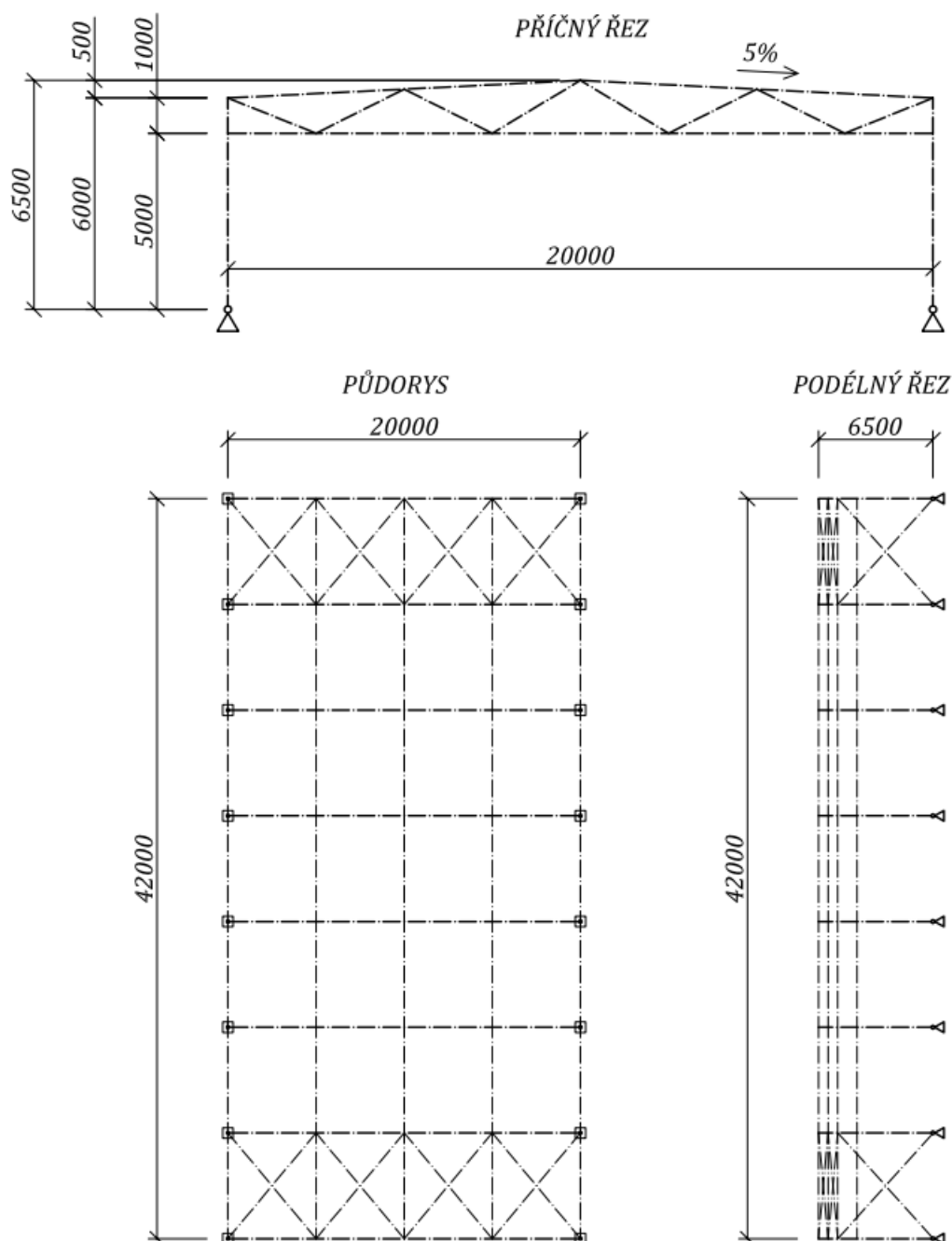
V závěrečném srovnání můžeme vidět především odlišnost tabulkového a softwarového řešení, která se zvětšuje s rostoucím poměrem zatěžovacích sil. Rozdíl mezi prvním a posledním zatěžovacím stavem je téměř dvojnásobný.

3 KONSTRUKCE OCELOVÉ SKLADOVACÍ HALY

V této části práce budou aplikovány poznatky a výsledky z předchozích kapitol na reálnou konstrukci. Aplikace bude provedena na nosných prvcích konstrukce ocelové skladovací haly.

3.1 Popis konstrukce

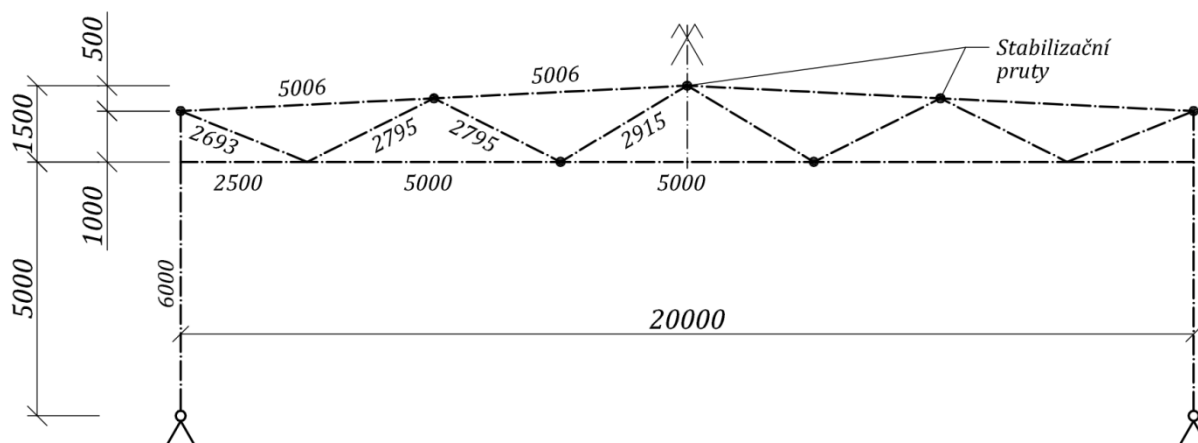
Konstrukce se skládá z 8 tuhých ráků uložených na kloubových podporách. Rám je tvořen příhradovým vazníkem spojeným s plnostěnným sloupem. Ztužení konstrukce je provedeno pomocí tažených diagonál v prvním a posledním poli konstrukce a stabilita vazníků je zajištěna pomocí stabilizačních prutů mezi horními a dolními pásy vazníku.



Obr. 3.1 – Schéma konstrukce skladovací haly

3.2 Geometrie příčné vazby

Geometrie příčné vazby byla určena celkovými rozměry haly a světlou výškou uvnitř haly. Geometrie samotného vazníku byla určena rozdělením rozpětí na 8 totožných úseků po 2,5 metrech.



Obr 3.2 – Geometrie příčné vazby

3.3 Dimenze prvků konstrukce

Průřezy jednotlivých prvků konstrukce byly převzaty z výpočtového modelu softwaru SCIA Engineer, kde byly předběžně navrženy s ohledem na ideální využití průřezu.

PRVEK		PRŮŘEZ
Vazník	Horní pás	HEA 180
	Dolní pás – krajní pole	HEA 160
	Dolní pás – prostřední pole	HEA 140
	Diagonály	TR 76,1/6,3
Stabilizační pruty		TR 73/3,6
Sloup		HEB 180
Stěnové ztužení		KR 20
Střešní ztužení		KR 16

3.4 Zatížení

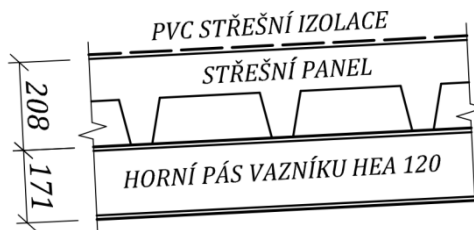
3.4.1 Zatížení stálé

- **ZS_1 – Vlastní tíha**

Zatížení od vlastní tíhy je zohledněno v globálním výpočtovém modelu softwaru SCIA Engineer, kde jsou nadefinovány dimenze použitých prvků.

- **ZS_2 – Ostatní stálé**

a) Zatížení od střešního pláště

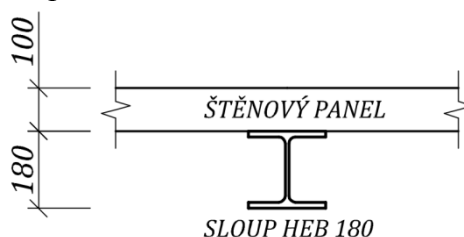


Obr. 3.3 – Schéma střešní panely

- použity velkorozponové kompozitní nosné střešní panely, které budou pokryty hydroizolační PVC folií
- panely budou kotveny přímo na horní pás vazníků, čímž bude zabráněno klopení nosníků a prostorovému vzpěru horního pásu
- vlastnosti panelu:
 - rozměry: 6000x1000x208 mm
 - hmotnost: 20,1 kg/m²
- vlastnosti PVC folie:
 - hmotnost: 1,87 kg/m²

$$g_{1,k} = 0,201 + 0,0187 \cong 0,22 \text{ kNm}^{-2}$$

b) Zatížení od obvodového pláště



Obr. 3.4 – Schéma stěnové panely

- velkoformátový tepelně izolační panel
- panely budou kotveny přímo na sloupce haly, čímž bude zabráněno klopení a prostorovému vzpěru těchto sloupů
- vlastnosti panelu:
 - rozměry: 6000x100x100 mm
 - hmotnost: 12,83 kg/m²

$$g_{1,k} = 0,128 \text{ kNm}^{-2}$$

3.4.2 Zatížení sněhem

Sněhová oblast:

II – Brno

Charakteristická hodnota zatížení sněhem:

$$s_k = 1,0 \text{ kPa}$$

Kategorie terénu:

normální krajina

Součinitel okolního prostředí:

$$c_e = 1,0$$

Tvarový součinitel:

$$\mu_l = 0,8 \quad \text{pro } \alpha = < 0^\circ; 30^\circ >$$

Tepelný součinitel:

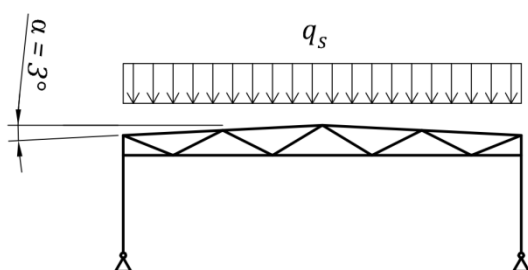
$$c_t = 1,0$$

Zatížení sněhem:

$$s = q_s = \mu_l \cdot c_e \cdot c_t \cdot s_k$$

$$s = 0,8 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 0,8 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$$

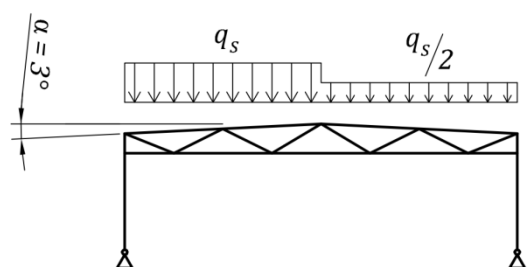
- ZS_3 – Sníh plný**



Obr. 3.5 – Sníh plný

$$s = q_s = 0,8 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$$

- ZS_4 – Sníh levý**

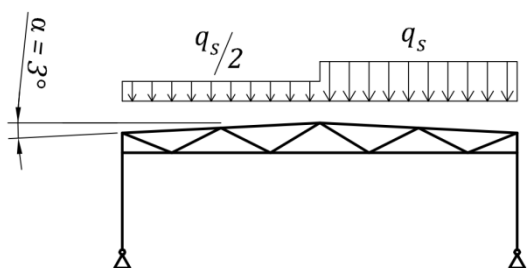


Obr. 3.6 – Sníh levý

$$s = q_s = 0,8 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$q_s/2 = 0,8/2 = 0,4 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$$

- ZS_5 – Sníh pravý**



Obr. 3.7 – Sníh pravý

$$s = q_s = 0,8 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$q_s/2 = 0,8/2 = 0,4 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$$

3.4.3 Zatížení větrem

Větrná oblast:

II – Brno

Výchozí základní rychlost větru:

$$v_{b,0} = 25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Součinitel směru větru:

$$c_{dir} = 1,0$$

Součinitel ročního období:

$$c_{season} = 1,0$$

Základní rychlost větru:

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0}$$

$$v_b = 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 25 = 25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Kategorie terénu:

kategorie III

Parametr drsnosti terénu:

$$z_0 = 0,3 \text{ m}$$

Výška hřebene konstrukce:

$$z = 6,5 \text{ m}$$

Součinitel terénu:

$$k_r = 0,19 \left(\frac{z_0}{z_{0II}} \right)^{0,07}$$

$$k_r = 0,19 \left(\frac{0,3}{0,05} \right)^{0,07} = 0,215$$

Součinitel drsnosti terénu:

$$c_{r(z)} = k_r \cdot \ln(z/z_0)$$

$$c_{r(6,5)} = 0,215 \cdot \ln\left(\frac{6,5}{0,3}\right) = 0,66$$

Součinitel orografie:

$$c_{o(6,5)} = 1,0$$

Střední rychlost větru:

$$v_{m(z)} = c_{r(z)} \cdot c_{o(z)} \cdot v_b$$

$$v_{m(6,5)} = 0,661 \cdot 1,0 \cdot 25 = 16,525 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Součinitel turbulence:

$$k_1 = 1,0$$

Intenzita turbulence:

$$l_{v(z)} = \frac{k_1}{c_{o(z)} \cdot \ln(z/z_0)}$$

$$l_{v(6,5)} = \frac{1,0}{1,0 \cdot \ln\left(\frac{6,5}{0,3}\right)} = 0,325$$

Hustota vzduchu:

$$\rho = 1,25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

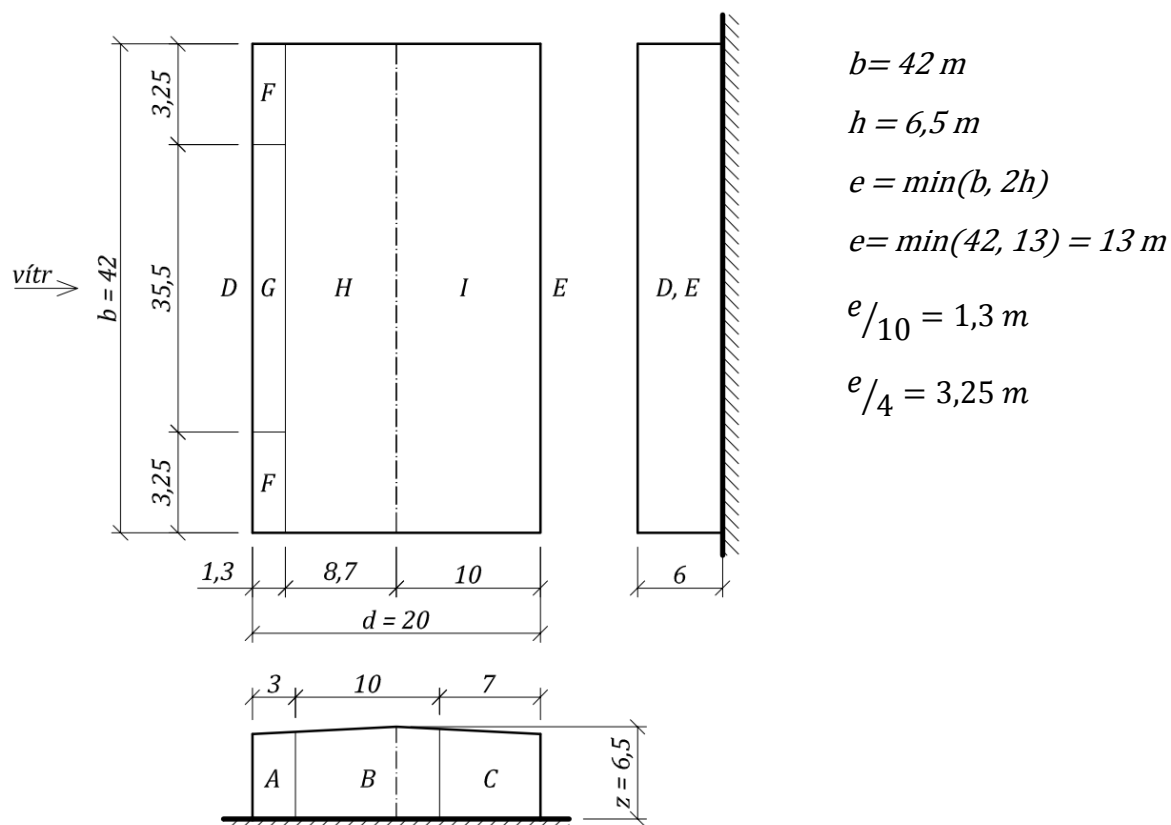
Maximální dynamický tlak:

$$q_{p(z)} = [1 + 7 \cdot l_{v(z)}] \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot v_{m(z)}^2$$

$$q_{p(6,5)} = [1 + 7 \cdot 0,325] \cdot 0,5 \cdot 1,25 \cdot 16,525^2$$

$$\mathbf{q_{p(6,5)} = 0,559 \text{ kPa}}$$

- ZS_6 – Vítr kolmo na osu – tlak na střeše
- ZS_7 – Vítr kolmo na osu – sání na střeše



Obr. 3.8 – Vítr kolmo na osu

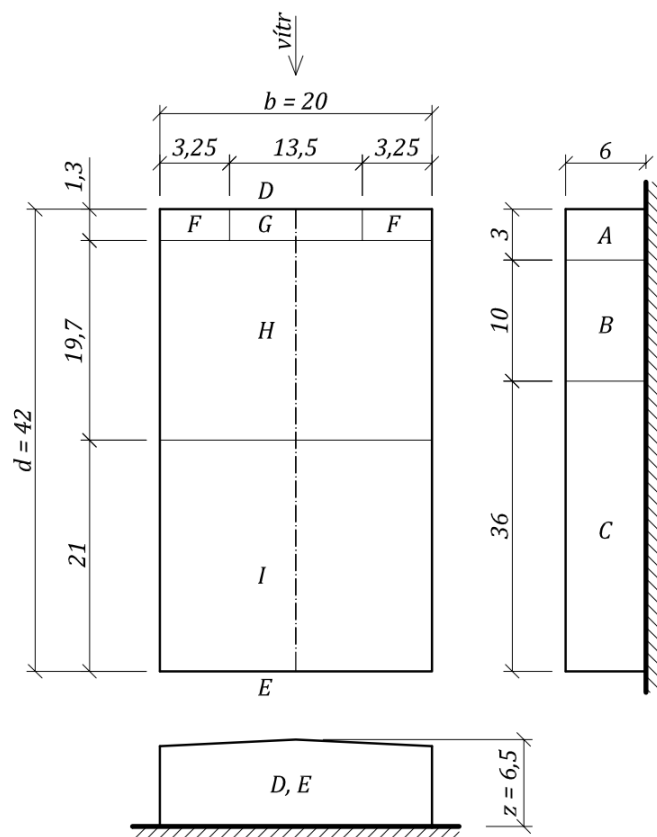
Tabulka zatížení od větru kolmého na osu

Oblast	Plocha	Součinitel tlaku větru		Zatížení
	[m ²]			[kN·m ²]
A	19,5 > 10	C_{pe10}	- 1,20	- 0,67
B	65 > 10	C_{pe10}	- 0,86	- 0,48
C	45,5 > 10	C_{pe10}	- 0,50	- 0,28
D	252 > 10	C_{pe10}	+ 0,71	+ 0,40
E	252 > 10	C_{pe10}	- 0,33	- 0,18
F	4,225 < 10	$C_{pe}^{(4)}$	- 2,00	- 1,12
G	46,15 > 10	C_{pe10}	- 1,20	- 0,67
H	365,4 > 10	C_{pe10}	- 0,70	- 0,39
I	420 > 10	C_{pe10}	+ 0,11	+ 0,11
			- 0,11	- 0,11

⁽⁴⁾ Součinitel tlaku větru pro oblast F s plochou v rozmezí 1 – 10m²:

$$c_{pe} = c_{pe1} - (c_{pe1} - c_{pe10}) \log A = -2,5 - (-2,5 - (-1,7)) \log 4,225 = -2,0$$

- **ZS_8 – Vítr rovnoběžný s osou – tlak na střeše**
- **ZS_9 – Vítr rovnoběžný s osou – sání na střeše**



$$b = 20 \text{ m}$$

$$h = 6,5 \text{ m}$$

$$e = \min(b, 2h)$$

$$e = \min(42, 13) = 13 \text{ m}$$

$$e/10 = 1,3 \text{ m}$$

$$e/4 = 3,25 \text{ m}$$

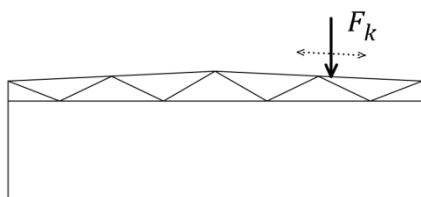
Obr. 3.8 – Vítr kolmo na osu

Tabulka zatížení od větru rovnoběžného s osou

Oblast	Plocha	Součinitel tlaku větru		Zatížení
	[m ²]			[kN·m ²]
A	18 > 10	C _{pe10}	- 1,20	- 0,67
B	60 > 10	C _{pe10}	- 0,80	- 0,48
C	216 > 10	C _{pe10}	- 0,50	- 0,28
D	130 > 10	C _{pe10}	+ 0,71	+ 0,40
E	130 > 10	C _{pe10}	- 0,33	- 0,18
F	4,225 < 10	C _{pe}	- 2,00	- 1,12
G	17,55 > 10	C _{pe10}	- 1,20	- 0,67
H	394 > 10	C _{pe10}	- 0,70	- 0,39
I	420 > 10	C _{pe10}	+ 0,20	+ 0,11
			- 0,20	- 0,11

3.4.4 Užité zatížení

- **ZS_10 – Osamělé břemeno**

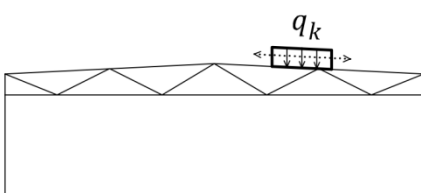


Obr. 3.9 – Osamělé břemeno

- osamělé břemeno reprezentující například údržbáře na střešním plášti
- zatížení je umístěno na střešním plášti tak, aby vyvozovalo v dané kombinaci nejnepříznivější účinky

$$F_k = 1 \text{ kN}$$

- **ZS_11 – Spojité zatížení**



Obr. 3.10 – Spojité zatížení

- spojité zatížení na ploše 10 m^2 reprezentující například materiál při pokládce střešního pláště
- zatížení je umístěno na střešním plášti tak, aby vyvozovalo v dané kombinaci nejnepříznivější účinky

$$q_k = 0,75 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$$

3.4.5 Stabilizační zatížení

Stabilizační zatížení by mělo být dle ČSN 1993-1-1^[12] (kapitola 5.3.3) použito u vyztužených systémů, na které působí podélné zatížení, jehož účinky jsou zohledněny počáteční imperfekcí ve formě ekvivalentního stabilizujícího zatížení a ekvivalentních stabilizujících sil.

Na konstrukci řešené v této práci se tyto účinky téměř neprojeví, protože konstrukce je z obou stran ztužena v prvním poli, kde jsou zachyceny prakticky všechny účinky podélného zatížení pomocí diagonálních ztužidel. Z těchto důvodů jsou na konstrukci aplikovány pouze účinky stabilizujících sil.

- **ZS_12 – Stabilizující síly**

- stabilizující síly jsou umístěny v krajním poli konstrukce do uzlů, v nichž jsou umístěny stabilizační pruty
- velikost stabilizujících sil je dána jako 1% z maximální tlakové síly ve stabilizovaných prutech a působí ve směru podélného zatížení

3.5 Kombinace zatížení

Kombinace zatížení byly automaticky vytvořeny pomocí softwaru SCIA Engineer. Vstupními hodnotami pro tvorbu kombinací jsou jednotlivé zatěžovací stavy, které jsou zařazeny do daných zatěžovacích skupin. Pro mezní stavy únosnosti vytvořeny kombinace dle normových rovnic 6.10.a a 6.10.b^[13] (v softwaru označováno jako EN-MSÚ (STR/GEO) sada B). Pro mezní stav použitelnosti vytvořena samostatná kombinace s charakteristickými hodnotami zatížení (v softwaru označováno jako EN-MSP charakteristická).

Pro výpočet vnitřních sil na konstrukci byly vytvořeny dva globální modely konstrukce. V prvním modelu byly zjištěny vnitřní síly na všech nosných prvcích kromě tažených diagonálních ztužidel, pro které byl vytvořen model druhý, v němž byla odstraněna diagonální ztužidla namáhaná tlakem.

3.5.1 Přehled zatěžovacích stavů

Označení	Název	Skupina zatížení
ZS_1	Vlastní tíha	Zatížení stálé
ZS_2	Ostatní stálé	
ZS_3	Sníh plný	Zatížení sněhem
ZS_4	Sníh levý	
ZS_5	Sníh pravý	
ZS_6	Vítr kolmo na osu – tlak na střeše	Zatížení větrem
ZS_7	Vítr kolmo na osu – sání na střeše	
ZS_8	Vítr rovnoběžný s osou – tlak na střeše	
ZS_9	Vítr rovnoběžný s osou – sání na střeše	
ZS_10	Osamělé břemeno	Užitné zatížení
ZS_11	Spojité zatížení	
ZS_12	Stabilizující síly	Stabilizační zatížení

3.5.2 Přehled kombinací

Kombinace MSÚ vytvořeny dle následujících kombinačních pravidel:

$$6.10.a: \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

$$6.10.b: \sum_{j \geq 1} \xi_j \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

Pro dané zatěžovací stavy byly uvažovány dvě skupiny kombinací a to z důvodu, aby na konstrukci střechy zároveň nepůsobil sníh a plošné užitné zatížení od údržby.

Tabulka obsahu kombinací

Ozn.	CO1_MSÚ – Stálé + sníh	CO2_MSÚ - Stálé + údržba
Zatěžovací stavy	ZS_1 - Vlastní tíha	ZS_1 - Vlastní tíha
	ZS_2 - Ostatní stálé	ZS_2 - Ostatní stálé
	ZS_3 - Sníh plný	ZS_6 - Vítr kolmo na osu – tlak
	ZS_4 - Sníh levý	ZS_7 - Vítr kolmo na osu – sání
	ZS_5 - Sníh pravý	ZS_8 - Vítr rovnoběžný s osou – tlak
	ZS_6 - Vítr kolmo na osu – tlak	ZS_9 - Vítr rovnoběžný s osou – sání
	ZS_7 - Vítr kolmo na osu – sání	ZS_10 - Osamělé břemeno
	ZS_8 - Vítr rovnoběžný s osou – tlak	ZS_10 - Osamělé břemeno
	ZS_9 - Vítr rovnoběžný s osou – sání	ZS_12 - Stabilizující síly
	ZS_10 - Osamělé břemeno	
	ZS_12 - Stabilizující síly	

3.5.3 Kombinační klíč

Kombinační klíče vytvořeny automaticky softwarem SCIA Engineer.

Jméno	Popis kombinací					
1	ZS_1*1,15	+ZS_2*1,15	+ZS_3*0,75	+ZS_6*1,50	+ZS_10*1,50	
2	ZS_1*1,15	+ZS_2*1,15	+ZS_3*1,50	+ZS_8*0,90	+ZS_10*1,50	+ZS_12*0,90
3	ZS_1*1,00	+ZS_2*1,00	+ZS_8*1,50	+ZS_10*1,50	+ZS_11*1,50	+ZS_12*0,90
4	ZS_1*1,00	+ZS_2*1,00	+ZS_7*1,50			
5	ZS_1*1,00	+ZS_2*1,00	+ZS_7*1,50	+ZS_10*1,50		
6	ZS_1*1,00	+ZS_2*1,00	+ZS_7*1,50	+ZS_10*1,50	+ZS_11*1,50	
7	ZS_1*1,00	+ZS_2*1,00	+ZS_8*1,50			
8	ZS_1*1,15	+ZS_2*1,15	+ZS_3*0,75	+ZS_8*0,90	+ZS_12*1,50	
9	ZS_1*1,15	+ZS_2*1,15	+ZS_4*1,50	+ZS_8*0,90		
10	ZS_1*1,15	+ZS_2*1,15	+ZS_5*1,50	+ZS_6*0,90	+ZS_10*1,50	
11	ZS_1*1,15	+ZS_2*1,15	+ZS_3*0,75	+ZS_6*1,50		
12	ZS_1*1,15	+ZS_2*1,15	+ZS_4*0,75	+ZS_7*1,50		
13	ZS_1*1,15	+ZS_2*1,15	+ZS_4*0,75	+ZS_7*1,50	+ZS_10*1,50	
14	ZS_1*1,15	+ZS_2*1,15	+ZS_9*1,50			
15	ZS_1*1,00	+ZS_2*1,00	+ZS_3*1,50	+ZS_8*0,90	+ZS_10*1,50	+ZS_12*0,90
16	ZS_1*1,00	+ZS_2*1,00	+ZS_9*1,50			
17	ZS_1*1,35	+ZS_2*1,35	+ZS_4*0,75	+ZS_8*0,90	+ZS_10*1,50	+ZS_12*0,90
18	ZS_1*1,35	+ZS_2*1,35	+ZS_5*0,75	+ZS_6*0,90	+ZS_10*1,50	
19	ZS_1*1,15	+ZS_2*1,15	+ZS_8*1,50	+ZS_10*1,50	+ZS_11*1,50	
20	ZS_1*1,15	+ZS_2*1,15	+ZS_7*1,50			
21	ZS_1*1,15	+ZS_2*1,15	+ZS_7*1,50	+ZS_10*1,50	+ZS_11*1,50	
22	ZS_1*1,15	+ZS_2*1,15	+ZS_3*1,50	+ZS_8*0,90	+ZS_10*1,50	
23	ZS_1*1,15	+ZS_2*1,15	+ZS_3*1,50	+ZS_8*0,90		
24	ZS_1*1,15	+ZS_2*1,15	+ZS_5*0,75	+ZS_6*1,50		
25	ZS_1*1,35	+ZS_2*1,35				
26	ZS_1*1,15	+ZS_2*1,15	+ZS_3*1,50	+ZS_6*0,90		
27	ZS_1*1,15	+ZS_2*1,15	+ZS_3*0,75	+ZS_8*1,50	+ZS_10*1,50	+ZS_12*0,90
28	ZS_1*1,15	+ZS_2*1,15	+ZS_3*1,50	+ZS_10*1,50		
29	ZS_1*1,15	+ZS_2*1,15	+ZS_3*1,50			
30	ZS_1*1,15	+ZS_2*1,15	+ZS_3*1,50	+ZS_8*0,90	+ZS_12*0,90	

3.6 Vnitřní síly

3.6.1 Příhradový vazník

3.6.1.1 Horní pás HEA180

Prvek	css	dx [m]	Stav	N [kN]	Vy [kN]	Vz [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Mz [kNm]
B238	Horní pás - HEA180	5,006	CO1/2	-324,78	0,00	-24,30	0,00	-18,87	0,14
B40	Horní pás - HEA180	5,006	CO2/3	53,97	-0,01	5,45	0,00	4,74	0,15
B7	Horní pás - HEA180	0,000	CO1/8	-70,45	-0,05	2,29	0,00	-0,94	0,31
B5	Horní pás - HEA180	0,000	CO1/8	-70,72	0,05	3,12	0,00	-3,03	0,06
B201	Horní pás - HEA180	5,006	CO1/9	-143,38	0,02	-27,65	0,00	-20,50	0,09
B174	Horní pás - HEA180	0,000	CO1/10	-109,19	0,00	27,87	0,00	-21,62	0,02
B267	Horní pás - HEA180	0,000	CO1/1	-57,10	0,04	-1,13	-0,02	0,00	0,00
B4	Horní pás - HEA180	0,000	CO1/1	-58,42	-0,04	2,44	0,02	0,00	0,00
B207	Horní pás - HEA180	2,781	CO1/2	-163,43	-0,01	1,23	-0,01	20,56	0,03
B4	Horní pás - HEA180	5,006	CO1/11	-58,16	-0,04	-2,85	0,02	-1,03	-0,18
B5	Horní pás - HEA180	5,006	CO1/8	-70,45	0,05	-2,29	0,00	-0,94	0,31

3.6.1.2 Dolní pás (krajní pole) HEA160

Prvek	css	dx [m]	Stav	N [kN]	Vy [kN]	Vz [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Mz [kNm]
B216	Dolní pás - HEA160	0,000	CO1/3	-62,80	0,01	0,25	0,00	0,44	-0,01
B176	Dolní pás - HEA160	0,000	CO2/14	42,26	0,00	0,20	0,00	0,00	0,00
B275	Dolní pás - HEA160	0,000	CO1/20	32,28	-0,15	0,42	-0,02	0,00	0,00
B11	Dolní pás - HEA160	0,000	CO1/21	32,20	0,15	0,42	0,02	0,00	0,00
B216	Dolní pás - HEA160	2,500	CO1/7	-14,03	-0,05	-0,96	-0,01	0,00	0,00
B209	Dolní pás - HEA160	0,000	CO1/7	-14,03	0,05	0,95	0,01	0,00	0,00
B275	Dolní pás - HEA160	0,000	CO1/3	30,07	-0,15	0,44	-0,02	0,00	0,00
B11	Dolní pás - HEA160	0,000	CO1/3	29,98	0,15	0,44	0,02	0,00	0,00
B110	Dolní pás - HEA160	2,500	CO1/22	17,15	0,01	-0,67	0,00	-0,62	0,02
B216	Dolní pás - HEA160	0,000	CO1/23	-13,40	-0,05	-0,16	-0,01	1,34	0,14
B275	Dolní pás - HEA160	2,500	CO1/20	32,28	-0,15	-0,44	-0,02	-0,03	-0,37
B11	Dolní pás - HEA160	2,500	CO1/21	32,20	0,15	-0,44	0,02	-0,03	0,37

3.6.1.3 Dolní pás (vnitřní pole) HEA140

Prvek	css	dx [m]	Stav	N [kN]	Vy [kN]	Vz [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Mz [kNm]
B113	Dolní pás_2 - HEA140	0,000	CO1/4	-40,40	0,00	0,60	0,00	-0,73	0,04
B212	Dolní pás_2 - HEA140	0,000	CO1/7	335,97	0,00	0,70	0,00	0,96	0,11
B276	Dolní pás_2 - HEA140	0,000	CO1/3	76,62	-0,05	0,65	0,00	-0,03	0,01
B12	Dolní pás_2 - HEA140	0,000	CO1/3	78,69	0,05	0,65	0,00	-0,01	-0,01
B210	Dolní pás_2 - HEA140	5,000	CO1/24	192,52	0,02	-0,89	0,00	0,28	0,13
B212	Dolní pás_2 - HEA140	0,000	CO1/25	146,06	0,00	0,90	0,00	-0,21	-0,01
B276	Dolní pás_2 - HEA140	0,000	CO1/6	8,73	-0,05	0,58	0,00	-0,37	0,01
B12	Dolní pás_2 - HEA140	0,000	CO2/14	10,80	0,05	0,57	0,00	-0,35	-0,01
B144	Dolní pás_2 - HEA140	5,000	CO2/26	-27,45	0,01	-0,71	0,00	-0,77	0,05
B214	Dolní pás_2 - HEA140	2,778	CO1/7	306,86	-0,02	0,00	0,00	2,08	0,07
B276	Dolní pás_2 - HEA140	5,000	CO1/27	14,43	-0,05	-0,73	0,00	-0,57	-0,24
B12	Dolní pás_2 - HEA140	5,000	CO2/28	16,50	0,05	-0,73	0,00	-0,57	0,24

3.6.1.4 Diagonály TR76,1/6,3

Prvek	css	dx [m]	Stav	N [kN]	Vy [kN]	Vz [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Mz [kNm]
B230	Diagonály vazníku - RO76.1X6.3	2,795	CO1/5	-158,25	0,00	-0,37	0,00	-0,16	0,00
B231	Diagonály vazníku - RO76.1X6.3	2,693	CO1/5	193,39	0,00	-0,12	0,00	0,00	0,00
B26	Diagonály vazníku - RO76.1X6.3	0,000	CO1/3	30,95	-0,11	0,12	0,00	0,00	0,00
B290	Diagonály vazníku - RO76.1X6.3	0,000	CO1/3	29,64	0,11	0,12	0,00	0,00	0,00
B230	Diagonály vazníku - RO76.1X6.3	2,795	CO1/7	-158,25	0,00	-0,37	-0,02	-0,16	0,05
B258	Diagonály vazníku - RO76.1X6.3	0,000	CO1/29	-155,73	0,00	0,36	0,00	-0,16	0,00
B291	Diagonály vazníku - RO76.1X6.3	0,000	CO1/3	-21,41	0,02	0,16	-0,07	-0,04	-0,15
B27	Diagonály vazníku - RO76.1X6.3	0,000	CO1/3	-22,47	-0,02	0,18	0,07	-0,06	0,15
B62	Diagonály vazníku - RO76.1X6.3	2,915	CO1/30	-18,05	0,00	-0,34	0,00	-0,41	0,00
B230	Diagonály vazníku - RO76.1X6.3	0,000	CO1/7	-158,09	0,00	-0,06	-0,02	0,44	0,04
B26	Diagonály vazníku - RO76.1X6.3	2,693	CO1/3	30,83	-0,11	-0,19	0,00	-0,10	-0,30
B290	Diagonály vazníku - RO76.1X6.3	2,693	CO1/3	29,52	0,11	-0,19	0,00	-0,10	0,30

3.6.2 Stabilizační prut TR73/3,6

Prvek	css	dx [m]	Stav	N [kN]	Vy [kN]	Vz [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Mz [kNm]
B298	Stabilizační pruty - RO73X3.6	0,000	CO1/1	-20,02	0,00	0,21	0,00	0,00	0,00
B302	Stabilizační pruty - RO73X3.6	0,000	CO1/4	11,67	0,00	0,21	0,01	0,00	0,00
B298	Stabilizační pruty - RO73X3.6	0,000	CO1/3	7,99	0,00	0,18	0,00	0,00	0,00
B298	Stabilizační pruty - RO73X3.6	6,000	CO1/24	-0,03	0,00	-0,24	0,00	0,00	0,00
B298	Stabilizační pruty - RO73X3.6	0,000	CO1/24	-0,03	0,00	0,24	0,00	0,00	0,00
B361	Stabilizační pruty - RO73X3.6	0,000	CO1/2	-9,48	0,00	0,21	-0,03	0,00	0,00
B369	Stabilizační pruty - RO73X3.6	0,000	CO1/2	-9,48	0,00	0,21	0,03	0,00	0,00
B298	Stabilizační pruty - RO73X3.6	3,000	CO1/24	-0,03	0,00	0,00	0,00	0,37	0,00
B298	Stabilizační pruty - RO73X3.6	0,000	CO1/25	7,94	0,00	0,21	0,00	0,00	0,00

3.6.3 Sloup HEB180

Prvek	css	dx [m]	Stav	N [kN]	Vy [kN]	Vz [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Mz [kNm]
B200	Sloup - HEB180	0,000	CO1/7	-109,96	-0,01	-6,87	0,00	0,00	0,00
B1	Sloup - HEB180	6,000	CO2/12	20,07	-4,37	-6,71	0,00	0,00	-0,01
B1	Sloup - HEB180	0,000	CO1/6	-5,71	-7,51	11,33	0,00	0,00	0,00
B265	Sloup - HEB180	0,000	CO1/13	-1,62	7,51	11,35	0,00	0,00	0,00
B166	Sloup - HEB180	6,000	CO2/14	17,69	0,00	-46,02	0,00	0,00	0,00
B200	Sloup - HEB180	6,000	CO1/3	-61,86	0,00	57,20	0,00	0,00	0,00
B1	Sloup - HEB180	0,000	CO1/15	12,26	4,38	-5,89	0,00	0,00	0,00
B200	Sloup - HEB180	5,000	CO1/3	-63,92	0,00	-7,23	0,00	-56,39	0,01
B100	Sloup - HEB180	5,000	CO1/6	16,21	0,00	-0,16	0,00	44,22	0,00
B1	Sloup - HEB180	2,778	CO1/6	-2,18	-0,53	6,33	0,00	24,53	-11,16
B265	Sloup - HEB180	2,778	CO1/13	1,91	0,53	6,35	0,00	24,57	11,16

3.6.4 Stěnové ztužení KR20

Prvek	css	dx [m]	Stav	N [kN]	Vy [kN]	Vz [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Mz [kNm]
B426	Stěnové ztužení - RD20	0,000	CO1/4	-3,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
B428	Stěnové ztužení - RD20	8,485	CO2/27	26,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
B426	Stěnové ztužení - RD20	0,000	CO1/24	-0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

3.6.5 Střešní ztužení KR16

Prvek	css	dx [m]	Stav	N [kN]	Vy [kN]	Vz [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Mz [kNm]
B438	Střešní ztužení - RD16	0,000	CO1/4	-3,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
B436	Střešní ztužení - RD16	7,814	CO1/26	16,61	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
B436	Střešní ztužení - RD16	0,000	CO1/24	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

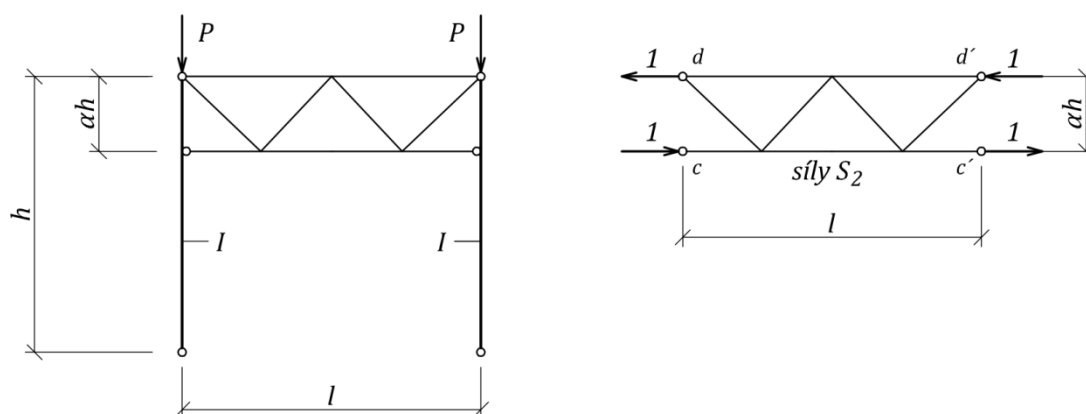
3.7 Vzpěrné délky nosných prvků

3.7.1 Sloup

Sloup je součástí tuhého příčného rámu uloženého na kloubových podporách, z čehož vyplývá, že vzpěrná délka prutu v rovině rámu bude přímo závislá na ohybové tuhosti příče, která je v tomto případě představována příhradovým vazníkem. Tuhého spojení mezi sloupem a vazníkem je docíleno díky kloubovým přípojmům na spodním a horním pásu vazníku. Ve směru z roviny rámu je vybočení zabráněno kloubovým uložením v patě sloupu a stabilizačními pruty v hlavě sloupu - vzpěrná délka je tedy rovna délce sloupu.

Řešení vzpěrné délky v rovině rámu dle publikace: Stabilita prutových konstrukcí ^[9]

Toto řešení spočívá v určení ohybové tuhosti vazníku pomocí vzájemného posunu bodů $c - c'$ a $d - d'$, které jsou umístěny na koncích vazníku. Vzájemného posunu bodů je dosaženo podélným namáháním vazníku jednotkovým zatížením (viz obr. 3.12).

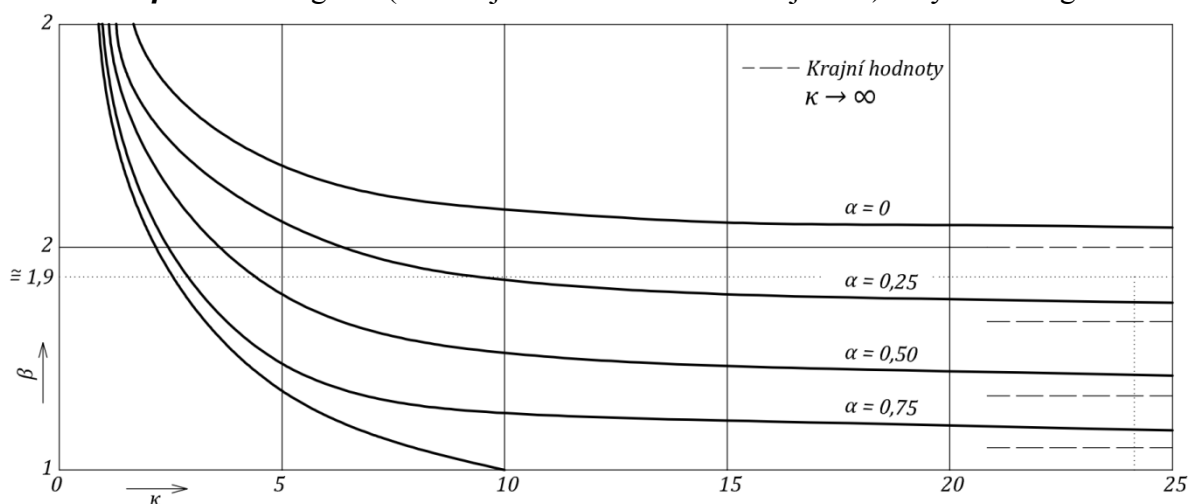


Obr. 3.12 – Ohybová tuhost vazníku

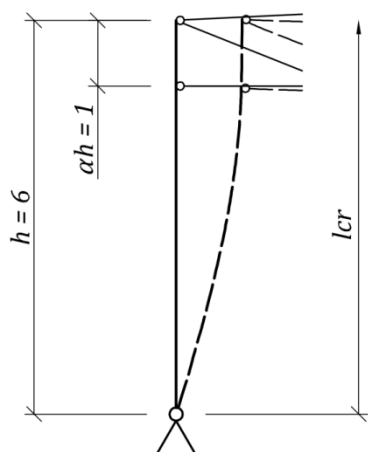
– vzpěrná délka se vypočte ze vzorce

$$l_{cr,y} = \beta \cdot h \quad (3.1)$$

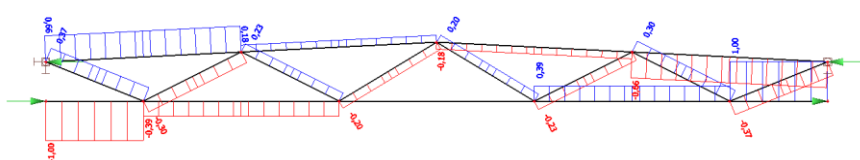
– součinitel β odečten z grafu (ve zdrojové literatuře označen jako ν) – výřez části grafu:



Obr. 3.13 – Graf součinitele vzpěrné délky pro příhradovou příče



Obr. 3.14 – Vzpěrná délka sloupu



Obr. 3.15 – Vnitřní síly na příhradovém vazníku

- vstupní hodnoty α a χ pro odečet součinitele vzpěru z grafu (zohledňující výšku připojení vazníku – délku ramene mezi klouby připojení, ohybovou tuhost vazníku)

$$\alpha \cdot h = 1$$

$$\alpha = \frac{1}{h} = \frac{1}{6} = 1,667 \quad (3.2)$$

$$\kappa = \frac{2 \cdot \alpha^2 \cdot h^3}{l \cdot \Sigma S_2^2 \cdot \rho} \quad (3.3)$$

$$\kappa = \frac{2 \cdot 1,667^2 \cdot 6^3}{3,831 \cdot 10^7 \cdot 12,976} = 24,14$$

Prut	ρ - Délka	S_2 Síla	$\rho \cdot S_2$
	[m]	[kN]	
1	5,006	0,660	2,181
2	5,006	0,180	0,162
3	5,006	0,180	0,162
4	5,006	0,660	2,181
5	2,500	1,000	2,500
6	5,000	0,390	0,761
7	5,000	0,000	0,000
8	5,000	0,390	0,761
9	2,500	1,000	2,500
10	2,693	0,370	0,369
11	2,795	0,300	0,252
12	2,795	0,230	0,148
13	2,915	0,200	0,117
14	2,915	0,200	0,117
15	2,795	0,230	0,148
16	2,795	0,300	0,252
17	2,693	0,370	0,369
Σ			12,976

Z grafu byl odečten součinitel vzpěrné délky $\beta \cong 1,9$, ze kterého byla vypočtena výsledná vzpěrná délka $L_{cr,y}$.

$$l_{cr,y} = \beta \cdot h = 1,9 \cdot 6000 = \mathbf{11400 \text{ mm}} \quad (3.4)$$

Řešení vzpěrné délky v rovině rámu pomocí softwaru SCIA Engineer^[5]

Pro toto řešení je třeba mít ve funkcionalitách projektu zapnutý modul - Stabilita.

Postup řešení:

1. Vynesení globálního modelu konstrukce, všech zatížení a jejich kombinací. Vzpěrné délky sloupů ponechány ve výchozím nastavení softwaru.
2. Provedení běžného lineárního výpočtu, z jehož výsledků byl vytvořen normový posudek oceli pro všechny sloupy. V tomto posudku byl nalezen sloup s nejvyšším využitím na vzpěrnou únosnost a odečten rozhodující klíč kombinace zatížení.

Lineární výpočet, Extrém : Globální

Výběr : Vše

Třída : Všechny MSU

Průřez : Sloup - HEB180

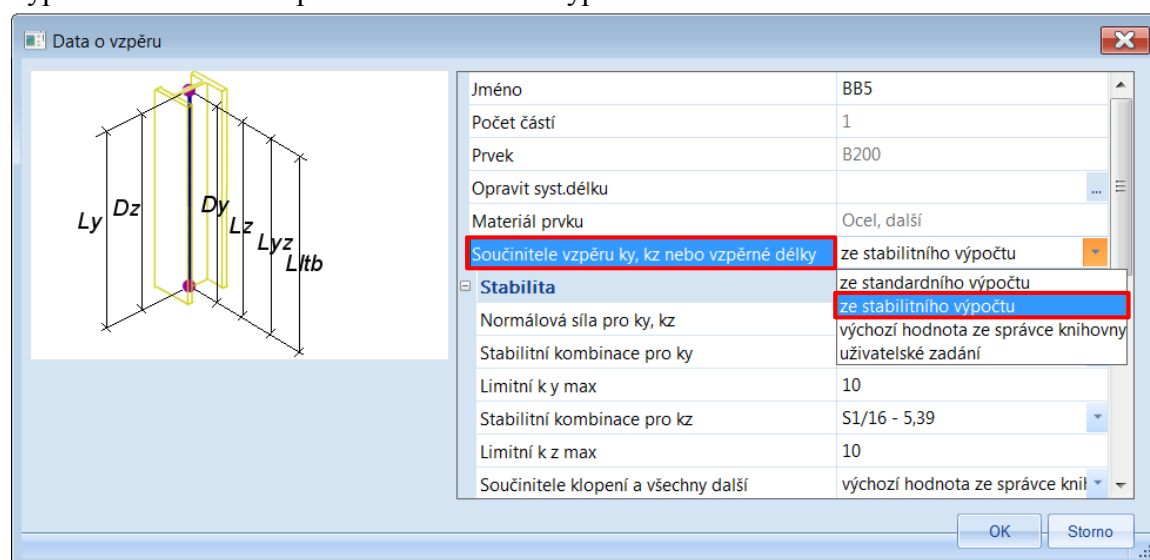
Prvek	css	mat	Stav	dx [m]	jed.posudek [-]	pevnost [-]	stab. posudek [-]
B200	Sloup - HEB180	S 235	CO1/9	0,000	6,88	0,07	6,88

Obr. 3.15 – Lineární posudek sloupu

8	ZS_1*1,15 +ZS_2*1,15 +ZS_4*0,75 +ZS_7*1,50 +ZS_10*1,50
9	ZS_1*1,15 +ZS_2*1,15 +ZS_3*1,50 +ZS_6*0,90 +ZS_10*1,50
10	ZS_1*1,15 +ZS_2*1,15 +ZS_3*1,50 +ZS_8*0,90 +ZS_10*1,50 +ZS_12*0,90

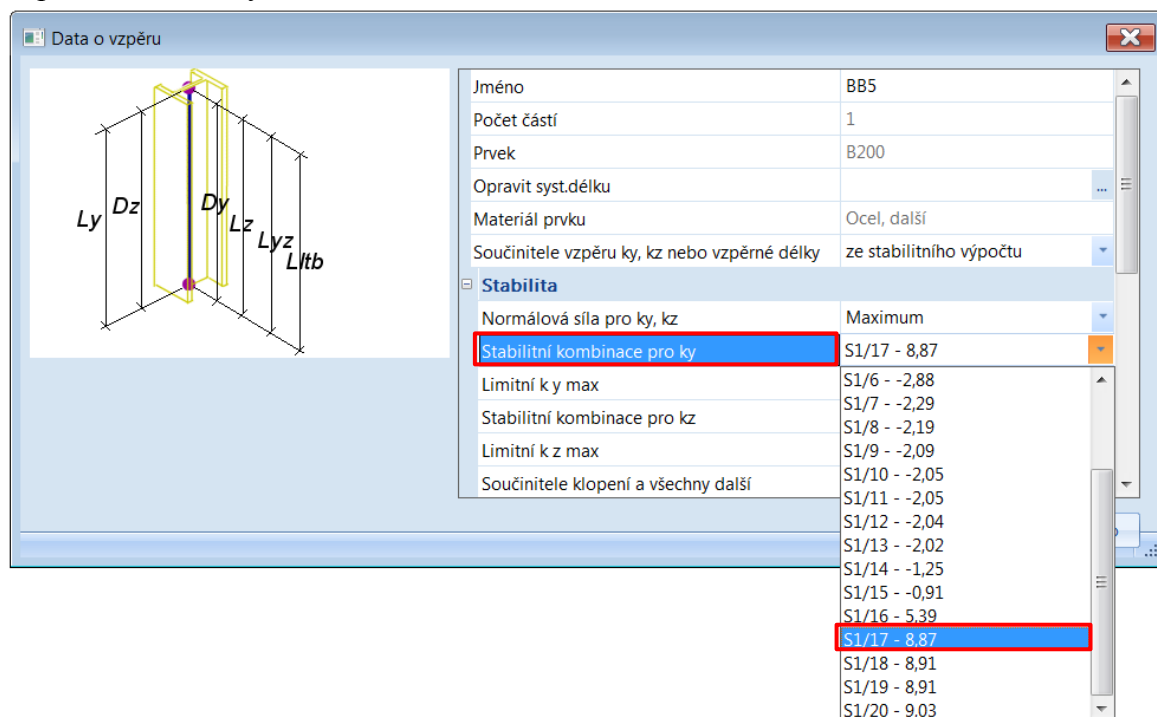
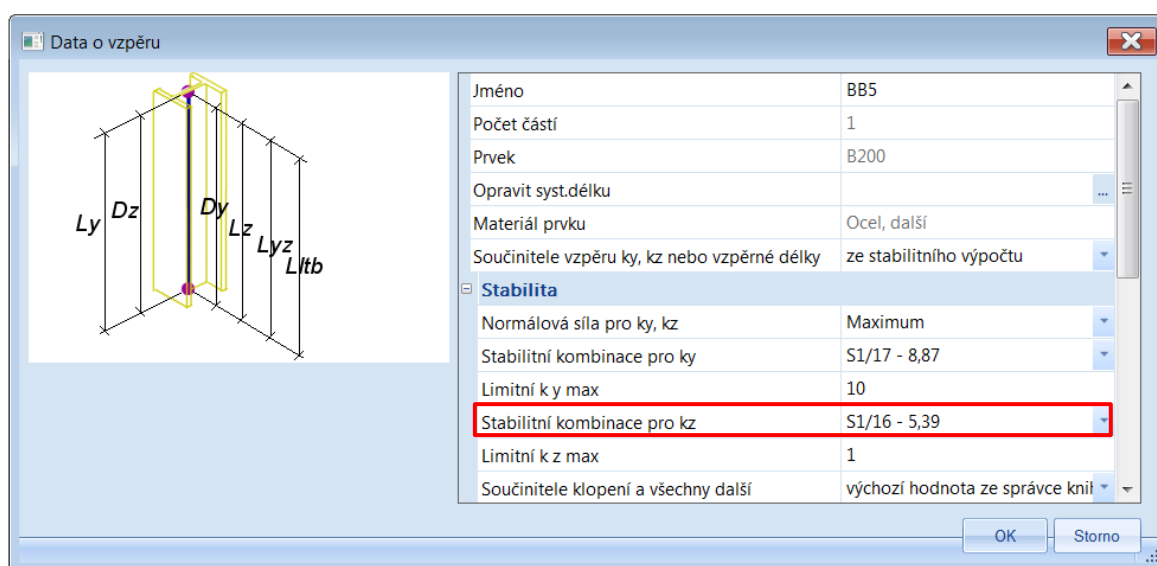
Obr. 3.16 – Klíč lineární kombinace

3. Z nalezeného klíče lineární kombinace byla vytvořena stabilitní kombinace s totožným klíčem. Proveden stabilitní výpočet se zatížením konstrukce stabilitní kombinací. Výsledkem výpočtu je součinitel kritického zatížení, při němž dochází ke ztrátě stability prutu.
4. Nastavení vzpěrné délky prutu ve vlastnostech daného prutu (sloupu), kde byl zadán výpočet součinitele vzpěru ze stabilitního výpočtu.



Obr. 3.17 – Nastavení vzpěrné délky sloupu

5. Pro výpočet potřebné vzpěrné délky bylo zapotřebí vybrat odpovídající součinitel kritického zatížení, to znamená takový, aby prut byl namáhán tlakem a aby součinitel odpovídal rovině vybočení.

Obr. 3.18 – Stabilitní kombinace pro k_y Obr. 3.19 – Stabilitní kombinace pro k_z

6. Vzpěrná délka se dopočte automaticky a její hodnota je zobrazena ve vlastnostech prutu.

Součinitele vzpěru												
	k_y	L_y [m]	l_y [m]	Posuvný y_y	k_z	L_z [m]	l_z [m]	Posuvný z_z	k_{yz}	k_{lt}	k	k_w
1	1,885	6,000	11,311	Podle zák...	1,000	6,000	6,000	Podle zák...	1,000	1	1,000	1,000

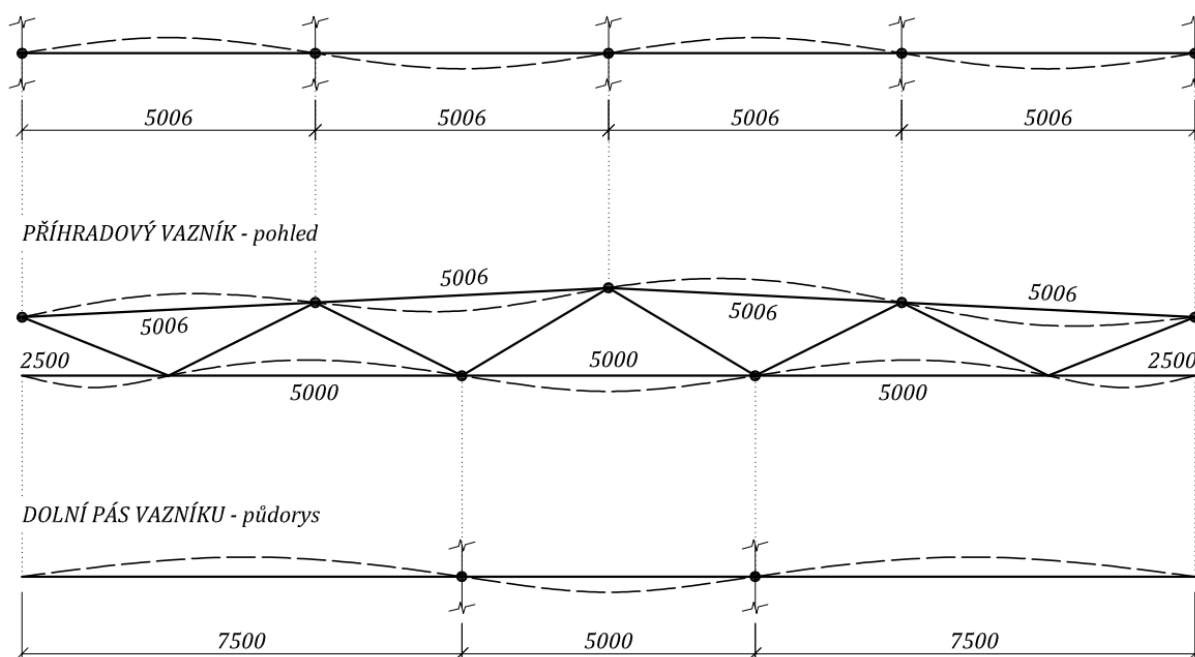
Obr. 3.20 – Vzpěrná délka sloupu – SCIA Engineer

3.7.2 Příhradový vazník

3.7.2.1 Pásky vazníku

U horního i dolního pásu je bráněno vybočení prutu pomocí diagonál vazníku a stabilizačních prutů mezi jednotlivými vazníky. V rovině vazníku jsou tedy vzpěrné délky rovny vzdálenostem mezi přípoji jednotlivých diagonál a z roviny vazníku jsou vzpěrné délky rovny vzdálenostem mezi přípoji jednotlivých stabilizačních prutů.

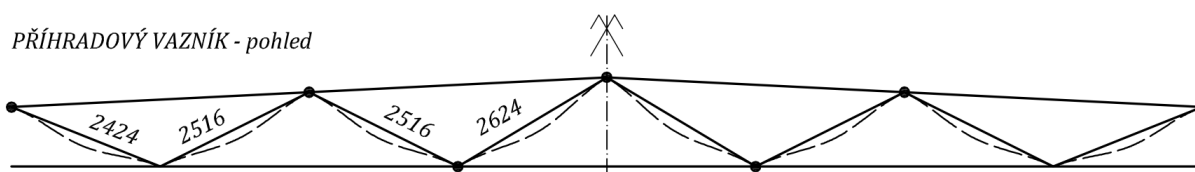
HORNÍ PÁS VAZNÍKU - půdorys



Obr. 3.15 – Vzpěrné délky pásů vazníku

3.7.2.2 Diagonály vazníku

Diagonální pruty jsou k pásům vazníku pevně připojeny obvodovým koutovým svarem, což by mohlo značit, že pruty budou na koncích pevně vetknuty a vzpěrná délka bude polovinou systémové délky. Pokud ovšem uvažíme, že pásy vazníku se vlivem zatížení přetvoří, je třeba vzpěrnou délku diagonál redukovat. Tomuto problému se věnuje přímo příloha v normě, kde je zjednodušeně řečeno: Jsou-li výplňové pruty pevně připojeny k pásům vazníku je možno uvažovat jejich vzpěrnou délku rovnu 90% systémové délky.

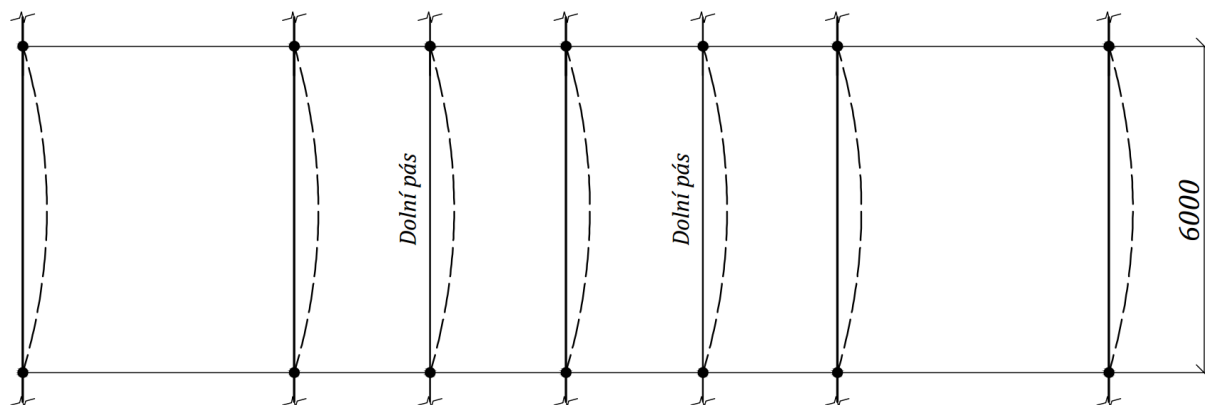


Obr. 3.16 – Vzpěrné délky diagonály vazníku

3.7.3 Stabilizační pruty

Stabilizační pruty jsou oboustranně připojeny kloubovým šroubovým přípojem, který nebrání pootočení prutu a vzpěrná délka je tedy rovna systémové délce.

Půdorys jednoho pole haly



Obr. 3.17 – Vzpěrné délky stabilizační pruty

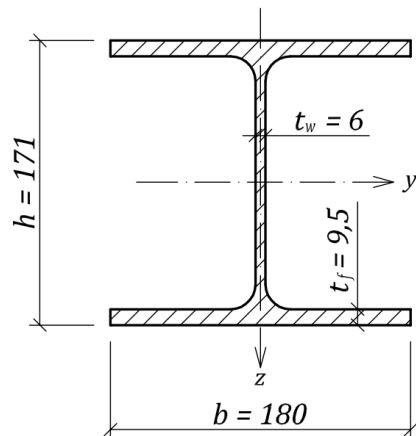
3.7.4 Ztužení

Stěnové i střešní ztužení je uvažováno jako pruty namáhané pouze na tah, proto není třeba řešit vzpěrné délky.

3.8 Posouzení prvků konstrukce na MSÚ

3.8.1 Příhradový vazník

3.8.1.1 Horní pás HEA180



Průřezové charakteristiky:

$$A = 4530 \text{ mm}^2$$

$$I_y = 2,51 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$$

$$I_z = 9,25 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

$$I_w = 6,02 \cdot 10^{10} \text{ mm}^6$$

$$I_t = 1,48 \cdot 10^5 \text{ mm}^4$$

$$W_{pl,y} = 3,25 \cdot 10^5 \text{ mm}^3$$

$$W_{pl,z} = 1,57 \cdot 10^5 \text{ mm}^3$$

$$i_y = 74 \text{ mm}$$

$$i_z = 45 \text{ mm}$$

Materiál: Ocel S235JR

$$E = 210 \text{ GPa}$$

$$f_y = 235 \text{ MPa}$$

Vzporné délky: - viz kapitola 3.7.2

$$L_{cr,y} = L_{cr,z} = 5006 \text{ mm}$$

Klasifikace průřezu:

$$\varepsilon = \sqrt{235/f_y} = \sqrt{235/235} = 1,0$$

$$c = \frac{b}{2} - \frac{t_w}{2} - r = \frac{180}{2} - \frac{6}{2} - 15 = 72 \text{ mm}$$

$$d = h - 2t_f - 2r = 171 - 2 \cdot 9,5 - 2 \cdot 15 = 122 \text{ mm}$$

$$z = \frac{N_{Ed}}{\frac{t_w \cdot f_y}{\gamma_{M0}}} = \frac{324,78 \cdot 10^3}{6 \cdot 235} = 230,340 \text{ mm} \rightarrow \text{celá stojina tlačená}$$

Stojina:

$$\frac{d}{t_w} = \frac{122}{6} = 20,33 \leq 33\varepsilon = 33 \cdot 1 = 33 \rightarrow 1. \text{ třída}$$

Pásnice:

$$\frac{c}{t_f} = \frac{72}{9,5} = 7,58 \leq 9\varepsilon = 9 \cdot 1 = 9 \rightarrow 1. \text{ třída}$$

Posouzení pevnosti průřezu

Tah

$$\lambda = \frac{L}{i_{\min}} = \frac{5006}{45} = 111 < 400$$

$$A_{\text{net}} = A - 2 \cdot d_0 = 4530 - 2 \cdot 14 = 4502 \text{ mm}^2$$

$$N_{t,Rd} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{4530 \cdot 10^{-6} \cdot 235 \cdot 10^3}{1,0} = 1064,550 \text{ kN} \\ \frac{0,9 \cdot A_{\text{net}} \cdot f_u}{\gamma_{M0}} = \frac{0,9 \cdot 4502 \cdot 360}{1,0} = 1458,648 \end{array} \right\} = 1064,550 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} = \frac{53,97}{1064,550} = 0,051 < 1,0 \quad \dots \text{VYHOVUJE}$$

Ohyb

$$M_{c,Rd} = M_{Pl,Rd} = \frac{W_{Pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{3,25 \cdot 10^{-4} \cdot 235 \cdot 10^3}{1,0} = 76,375 \text{ kNm}$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{21,62}{76,375} = 0,283 < 1,0 \quad \dots \text{VYHOVUJE}$$

Smyk

$$V_{Pl,Rd} = \frac{A_{v,z} \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = \frac{1099 \cdot 10^{-6} \cdot 235 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 1,0} = 149,109 \text{ kN}$$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Pl,Rd}} = \frac{27,87}{149,109} = 0,187 < 1 \quad \dots \text{VYHOVUJE}$$

$$V_{Ed} = 27,87 \text{ kN} < 0,5 \cdot V_{Pl,Rd} = 0,5 \cdot 149,109 = 74,555 \text{ kN}$$

Účinek posouvací síly je možné zanedbat (vliv smyku je nevýznamný).

Kroucení

Účinek kroucí síly je téměř nulový a proto je možné jej zanedbat.

Horní pás vazníku z hlediska pevnosti VYHOVUJE.

Posouzení stability prvkuPosouzení na vzpěr

$$\lambda_1 = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = \pi \cdot \sqrt{\frac{210 \cdot 10^9}{235 \cdot 10^6}} = 93,9$$

Kolmo na osu y

$$\bar{\lambda}_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{5,006}{0,074} \cdot \frac{1}{93,9} = 0,720$$

$$\lambda_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} = \frac{5,006}{0,074} = 68 < 200$$

$$\frac{h}{b} = \frac{171}{180} = 0,95 < 1,2 \quad t_f = 9,5 \text{ mm} < 40 \text{ mm} \rightarrow \text{křivka } b \rightarrow \alpha = 0,34$$

$$\phi_y = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2] = 0,5 \cdot [1 + 0,34 \cdot (0,72 - 0,2) + 0,72^2] = 0,848$$

$$\chi_y = \frac{1}{\phi_y + \sqrt{\phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{0,848 + \sqrt{0,848^2 - 0,72^2}} = 0,771$$

$$N_{b,Rd,y} = \frac{\chi_y \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0,771 \cdot 4530 \cdot 10^{-6} \cdot 235 \cdot 10^3}{1,0} = 820,768 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,y}} = \frac{324,78}{820,768} = 0,396 < 1,0 \quad \dots \quad \text{VYHOVUJE}$$

Kolmo na osu z

$$\bar{\lambda}_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{5,006}{0,045} \cdot \frac{1}{93,9} = 1,185$$

$$\lambda_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} = \frac{5,006}{0,045} = 111 < 200$$

$$\frac{h}{b} = \frac{171}{180} = 0,95 < 1,2 \quad t_f = 9,5 \text{ mm} < 40 \text{ mm} \rightarrow \text{křivka } c \rightarrow \alpha = 0,49$$

$$\phi_z = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2] = 0,5 \cdot [1 + 0,49 \cdot (1,185 - 0,2) + 1,185^2] = 1,443$$

$$\chi_z = \frac{1}{\phi_z + \sqrt{\phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{1,443 + \sqrt{1,443^2 - 1,185^2}} = 0,441$$

$$N_{b,Rd,z} = \frac{\chi_z \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0,441 \cdot 4530 \cdot 10^{-6} \cdot 235 \cdot 10^3}{1,0} = 469,467 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,z}} = \frac{324,78}{469,467} = 0,692 < 1,0 \quad \dots \quad \text{VYHOVUJE}$$

Klopení

Klopení umožněno pouze při působení záporného ohybového momentu (při tlačené spodní pásnici), v opačném případě je klopení bráněno pomocí tuhého střešního pláště.

Součinitele vzpěrné délky: $k_y = k_z = k_\omega = 1,0$

$z_j = 0$... dvouose symetrický průřez

- součinitel působení zatížení vzhledem ke středu smyku:

$$z_g = -\frac{h}{2} = -\frac{171}{2} = -85,5 \text{ mm}$$

- bezrozměrný parametr kroucení:

$$\kappa_{\omega t} = \frac{\pi}{k_\omega \cdot l} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot I_\omega}{G \cdot I_t}} = \frac{\pi}{1,0 \cdot 5,006} \cdot \sqrt{\frac{210 \cdot 10^9 \cdot 6,02 \cdot 10^{-8}}{81 \cdot 10^9 \cdot 1,48 \cdot 10^{-7}}} = 0,644$$

- bezrozměrný parametr nesymetrie průřezu:

$$\zeta_j = \frac{\pi \cdot z_j}{k_z \cdot l} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot I_z}{G \cdot I_t}} = 0$$

- bezrozměrný parametr působení zatížení:

$$\zeta_g = \frac{\pi \cdot z_g}{k_z \cdot l} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot I_z}{G \cdot I_t}} = \frac{\pi \cdot (-0,0855)}{1,0 \cdot 5,006} \cdot \sqrt{\frac{210 \cdot 10^9 \cdot 9,25 \cdot 10^{-6}}{81 \cdot 10^9 \cdot 1,48 \cdot 10^{-7}}} = -0,683$$

$$\kappa_{\omega t} = 0,538 \leq C_{1,1} = 1,13 \rightarrow C_1 = C_{1,0} + (C_{1,1} - C_{1,0}) = 1,13 + (1,13 - 1,13) = 1,13$$

$$C_2 = 0,46$$

$$C_3 = 0,53$$

- bezrozměrný kritický moment:

$$\mu_{cr} = \frac{C_1}{k_z} \cdot \left[\sqrt{1 + k_{\omega t}^2 + (C_1 \cdot \zeta_g - C_3 \cdot \zeta_j)^2} - (C_2 \cdot \zeta_g - C_3 \cdot \zeta_j) \right]$$

$$\mu_{cr} = \frac{1,13}{1,0} \cdot \left[\sqrt{1 + 0,644^2 + (1,13 \cdot (-0,683))^2} - (0,46 \cdot (-0,683)) \right] = 1,957$$

- kritický moment:

$$M_{cr} = \mu_{cr} \cdot \frac{\pi \cdot \sqrt{E \cdot I_z \cdot G \cdot I_t}}{l}$$

$$M_{cr} = 1,957 \cdot \frac{\pi \cdot \sqrt{210 \cdot 10^9 \cdot 9,25 \cdot 10^{-6} \cdot 81 \cdot 10^9 \cdot 1,45 \cdot 10^{-7}}}{5,006} = 185,505 \text{ kNm}$$

$$\overline{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{Pl,y} \cdot f_Y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{3,25 \cdot 10^{-4} \cdot 235 \cdot 10^3}{185,505}} = 0,642$$

– válcovaný I – průřez: $\frac{h}{b} = \frac{171}{180} = 0,95 < 1,2 \rightarrow$ křivka klopení $\beta \rightarrow \alpha_{LT} = 0,34$

$$\phi_{LT} = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha_{LT} \cdot (\overline{\lambda}_{LT} - \lambda_{LT,0}) + \beta \cdot \overline{\lambda}_{LT}^2 \right]$$

$$\phi_{LT} = 0,5 \cdot [1 + 0,34 \cdot (0,642 - 0,4) + 0,75 \cdot 0,642^2] = 0,695$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta \cdot \overline{\lambda}_{LT}^2}} = \frac{1}{0,695 + \sqrt{0,695^2 - 0,75 \cdot 0,642^2}} = 0,900$$

- opravný součinitel: $k_c = 0,94$

$$f = 1 - 0,5 \cdot (1 - k_c) \cdot \left[1 - 2 \cdot (\overline{\lambda}_{LT} - 0,8)^2 \right]$$

$$f = 1 - 0,5 \cdot (1 - 0,94) \cdot [1 - 2 \cdot (0,642 - 0,8)^2] = 0,971 < 1,0$$

- redukovaný součinitel klopení:

$$\chi_{LT,mod} = \frac{\chi_{LT}}{f} = \frac{0,900}{0,971} = 0,927$$

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT,mod} \cdot \frac{W_{Pl,y} \cdot f_Y}{\gamma_{M1}} = 0,927 \cdot \frac{3,25 \cdot 10^{-4} \cdot 235 \cdot 10^3}{1,0} = 70,800 \text{ kNm}$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} = \frac{21,62}{70,800} = 0,305 < 1,0 \dots \text{ VYHOVUJE}$$

Kombinace ohybu, smyku a osové síly

Kombinace bude řešena na prutu s označením B238.

Návrhové vnitřní síly na prutu:	N_{Ed}	=	-324,78	kN
	$M_{y,Ed}$	=	-18,87	kNm
	$M_{z,Ed}$	=	0,14	kNm
	$V_{z,Ed}$	=	-24,30	kNm

Smyková síla je menší než 50% smykové únosnosti, proto je možné ji zanedbat (viz výše).

Účinek ohybového momentu $M_{z,Ed}$ je téměř nulový, proto bude zanedbán.

$$\alpha_h = \frac{M_h}{M_s} = \frac{0}{18,87} = 0 \rightarrow \psi = 0 \rightarrow c_{my} = 0,95 + 0,05 \cdot \alpha_h = 0,95 + 0,05 \cdot 0 = 0,95$$

$$k_{yy} = c_{my} \cdot \left(1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}}\right)$$

$$k_{yy} = 0,95 \cdot \left(1 + (0,72 - 0,2) \cdot \frac{324,78}{0,771 \cdot \frac{1064,55}{1,0}}\right) = 1,145$$

$$k_{yy} = 1,145 < c_{my} \cdot \left(1 + 0,8 \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}}\right) = 0,95 \cdot \left(1 + 0,8 \cdot \frac{324,78}{0,771 \cdot \frac{1064,55}{1,0}}\right) = 1,251$$

$$k_{zy} = 0,6 \cdot k_{yy} = 0,6 \cdot 1,145 = 0,687$$

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_y \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1$$

$$\frac{324,78}{0,771 \cdot \frac{1064,55}{1,0}} + 1,145 \cdot \frac{18,87}{0,927 \cdot \frac{76,375}{1,0}} + 0 \leq 1$$

$$0,396 + 0,305 + 0 = 0,701 < 1 \quad \dots \quad \text{VYHOVUJE}$$

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_z \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1$$

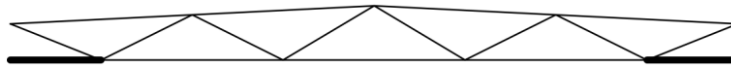
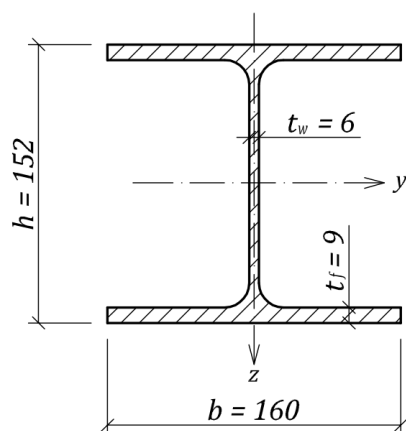
$$\frac{324,78}{0,441 \cdot \frac{1064,55}{1,0}} + 0,687 \cdot \frac{18,87}{0,927 \cdot \frac{76,375}{1,0}} + 0 \leq 1$$

$$0,692 + 0,183 + 0 = 0,875 < 1 \quad \dots \quad \text{VYHOVUJE}$$

Horní pás vazníku z hlediska ztráty stability VYHOVUJE.

3.8.1.2 Dolní pás – krajní pole HEA160

Pruty spodního pásu vazníku budou posuzovány pouze na osově síly, protože účinky posouvajících sil i momentů jsou zanedbatelné.



Průřezové charakteristiky:

A	$=$	3380	mm^2
I_y	$=$	$1,67 \cdot 10^7$	mm^4
I_z	$=$	$6,16 \cdot 10^6$	mm^4
I_w	$=$	$3,14 \cdot 10^{10}$	mm^6
I_t	$=$	$1,22 \cdot 10^5$	mm^4
i_y	$=$	66	mm
i_z	$=$	40	mm

Materiál: Ocel S235JR

$$E = 210 \text{ GPa}$$

$$f_y = 235 \text{ MPa}$$

$$f_u = 360 \text{ MPa}$$

Vzpěrné délky: - viz kapitola 3.7.2

$$L_{cr,y} = 2500 \text{ mm}$$

$$L_{cr,z} = 7500 \text{ mm}$$

$$L_{cr,\omega} = 7500 \text{ mm}$$

Posouzení pevnosti průřezu

Tah

$$\lambda = \frac{L}{i_{min}} = \frac{7500}{40} = 188 < 400$$

$$N_{t,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{3880 \cdot 10^{-6} \cdot 235 \cdot 10^3}{1,0} = 911,800 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} = \frac{42,26}{911,800} = 0,046 < 1,0 \text{ ... VYHOVUJE}$$

Dolní pás (krajní pole) vazníku z hlediska pevnosti VYHOVUJE.

Posouzení stability prvkuPosouzení na vzpěr

$$\lambda_1 = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = \pi \cdot \sqrt{\frac{210 \cdot 10^9}{235 \cdot 10^6}} = 93,9$$

Kolmo na osu y

$$\bar{\lambda}_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{2,500}{0,066} \cdot \frac{1}{93,9} = 0,403$$

$$\lambda_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} = \frac{2,500}{0,066} = 38 < 200$$

$$\frac{h}{b} = \frac{152}{160} = 0,95 < 1,2 \quad t_f = 9 \text{ mm} < 40 \text{ mm} \quad \rightarrow \quad \text{křivka } b \quad \rightarrow \quad \alpha = 0,34$$

$$\phi_y = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2] = 0,5 \cdot [1 + 0,34 \cdot (0,403 - 0,2) + 0,403^2] = 0,616$$

$$\chi_y = \frac{1}{\phi_y + \sqrt{\phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{0,616 + \sqrt{0,616^2 - 0,403^2}} = 0,924$$

$$N_{b,Rd,y} = \frac{\chi_y \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0,924 \cdot 3880 \cdot 10^{-6} \cdot 235 \cdot 10^3}{1,0} = 842,503 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,y}} = \frac{62,80}{820,768} = 0,077 < 1,0 \quad \dots \quad \text{VYHOVUJE}$$

Kolmo na osu z

$$\bar{\lambda}_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{7,500}{0,040} \cdot \frac{1}{93,9} = 1,997$$

$$\lambda_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} = \frac{7,500}{0,040} = 188 < 200$$

$$\frac{h}{b} = \frac{152}{160} = 0,95 < 1,2 \quad t_f = 9 \text{ mm} < 40 \text{ mm} \quad \rightarrow \quad \text{křivka } c \quad \rightarrow \quad \alpha = 0,49$$

$$\phi_z = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2] = 0,5 \cdot [1 + 0,49 \cdot (1,997 - 0,2) + 1,997^2] = 2,934$$

$$\chi_z = \frac{1}{\phi_z + \sqrt{\phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{2,934 + \sqrt{2,934^2 - 1,997^2}} = 0,197$$

$$N_{b,Rd,z} = \frac{\chi_z \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0,197 \cdot 3880 \cdot 10^{-6} \cdot 235 \cdot 10^3}{1,0} = 179,625 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,z}} = \frac{62,80}{179,625} = 0,350 < 1,0 \quad \dots \quad \text{VYHOVUJE}$$

Prostorový vzpěr (vzpěr zkroucením)

$$I_P = I_y + I_z + A \cdot a^2 = 1,67 \cdot 10^{-5} + 6,16 \cdot 10^{-6} = 2,286 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$$

$$\lambda_\omega = \sqrt{\frac{I_P}{\frac{I_\omega}{L_{cr,\omega}^2} + \frac{G \cdot I_t}{\pi^2 \cdot E}}} = \sqrt{\frac{2,286 \cdot 10^{-5}}{\frac{3,14 \cdot 10^{-8}}{7,5^2} + \frac{81 \cdot 10^9 \cdot 1,22 \cdot 10^{-7}}{\pi^2 \cdot 210 \cdot 10^9}}} = 65,514 < 200$$

$$\bar{\lambda}_\omega = \frac{\lambda_\omega}{\lambda_1} = \frac{65,514}{93,9} = 0,698$$

– prostorový vzpěr → křivka b → $\alpha = 0,34$

$$\phi_\omega = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_\omega - 0,2) + \bar{\lambda}_\omega^2] = 0,5 \cdot [1 + 0,34 \cdot (0,698 - 0,2) + 0,698^2] = 0,828$$

$$\chi_\omega = \frac{1}{\phi_\omega + \sqrt{\phi_\omega^2 - \bar{\lambda}_\omega^2}} = \frac{1}{0,828 + \sqrt{0,828^2 - 0,698^2}} = 0,785$$

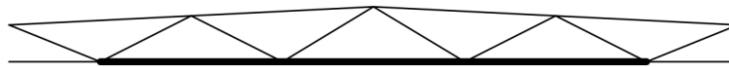
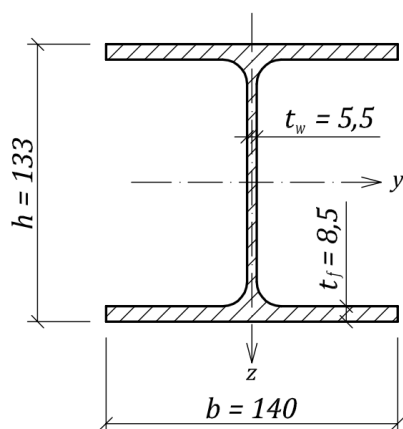
$$N_{b,Rd,\omega} = \frac{\chi_\omega \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0,785 \cdot 3880 \cdot 10^{-6} \cdot 235 \cdot 10^3}{1,0} = 715,763 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,\omega}} = \frac{62,80}{715,763} = 0,088 < 1,0 \dots \text{VYHOVUJE}$$

Dolní pás (krajní pole) vazníku z hlediska ztráty stability VYHOVUJE.

3.8.1.3 Dolní pás – vnitřní pole HEA140

Pruty spodního pásu vazníku budou posuzovány pouze na osově síly, protože účinky posouvajících sil i momentů jsou zanedbatelné.



Průřezové charakteristiky:

A	$=$	3140	mm^2
I_y	$=$	$1,03 \cdot 10^7$	mm^4
I_z	$=$	$3,89 \cdot 10^6$	mm^4
I_w	$=$	$1,51 \cdot 10^{10}$	mm^6
I_t	$=$	$8,13 \cdot 10^4$	mm^4
i_y	$=$	57	mm
i_z	$=$	35	mm

Materiál: Ocel S235JR

$$E = 210 \text{ GPa}$$

$$f_y = 235 \text{ MPa}$$

$$f_u = 360 \text{ MPa}$$

Vzpěrné délky: - viz kapitola 3.7.2

$$L_{cr,y} = 5000 \text{ mm}$$

$$L_{cr,z} = 7500 \text{ mm}$$

$$L_{cr,\omega} = 7500 \text{ mm}$$

Posouzení pevnosti průřezu

Tah

$$\lambda = \frac{L}{i_{min}} = \frac{7500}{35} = 214 < 400$$

$$N_{t,Rd} = N_{PL,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{3140 \cdot 10^{-6} \cdot 235 \cdot 10^3}{1,0} = 737,900 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} = \frac{335,97}{737,900} = 0,455 < 1,0 \text{ ...VYHOVUJE}$$

Dolní pás (vnitřní pole) vazníku z hlediska pevnosti **VYHOVUJE**.

Posouzení stability prvkuPosouzení na vzpěr

$$\lambda_1 = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = \pi \cdot \sqrt{\frac{210 \cdot 10^9}{235 \cdot 10^6}} = 93,9$$

Kolmo na osu y

$$\bar{\lambda}_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{5,000}{0,057} \cdot \frac{1}{93,9} = 0,934$$

$$\lambda_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} = \frac{5,000}{0,057} = 88 < 200$$

$$\frac{h}{b} = \frac{133}{140} = 0,95 < 1,2 \quad t_f = 9 \text{ mm} < 40 \text{ mm} \quad \rightarrow \quad \text{křivka } b \quad \rightarrow \quad \alpha = 0,34$$

$$\phi_y = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2] = 0,5 \cdot [1 + 0,34 \cdot (0,934 - 0,2) + 0,934^2] = 1,061$$

$$\chi_y = \frac{1}{\phi_y + \sqrt{\phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{1,061 + \sqrt{1,061^2 - 0,934^2}} = 0,639$$

$$N_{b,Rd,y} = \frac{\chi_y \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0,639 \cdot 3140 \cdot 10^{-6} \cdot 235 \cdot 10^3}{1,0} = 471,518 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,y}} = \frac{40,40}{471,518} = 0,086 < 1,0 \quad \dots \quad \text{VYHOVUJE}$$

Kolmo na osu z

$$\bar{\lambda}_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{7,500}{0,035} \cdot \frac{1}{93,9} = 2,282$$

$$\lambda_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} = \frac{7,500}{0,035} = 214 > 200$$

Pozn.: Pruty ve vnitřních polích dolního pásu vazníku budou převážně namáhány tahovými silami a vzpěrná délka $L_{cr,z}$ je pouze teoretická a při skutečném namáhání bude redukována působením diagonál vazníku. Z těchto důvodů je možné uvažovat částečné překročení doporučené limitní štíhlosti (dle ČSN 73 1401).

$$\frac{h}{b} = \frac{133}{140} = 0,95 < 1,2 \quad t_f = 9 \text{ mm} < 40 \text{ mm} \quad \rightarrow \quad \text{křivka } c \quad \rightarrow \quad \alpha = 0,49$$

$$\phi_z = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2] = 0,5 \cdot [1 + 0,49 \cdot (2,282 - 0,2) + 2,282^2] = 3,614$$

$$\chi_z = \frac{1}{\phi_z + \sqrt{\phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{3,614 + \sqrt{3,614^2 - 2,282^2}} = 0,156$$

$$N_{b,Rd,z} = \frac{\chi_z \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0,156 \cdot 3140 \cdot 10^{-6} \cdot 235 \cdot 10^3}{1,0} = 115,112 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,z}} = \frac{40,40}{115,112} = 0,351 < 1,0 \quad \dots \quad \text{VYHOVUJE}$$

Prostorový vzpěr (vzpěr zkroucením)

$$I_p = I_y + I_z + A \cdot a^2 = 1,03 \cdot 10^{-5} + 3,89 \cdot 10^{-6} = 1,419 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$$

$$\lambda_\omega = \sqrt{\frac{I_p}{\frac{I_\omega}{L_{cr,\omega}^2} + \frac{G \cdot I_t}{\pi^2 \cdot E}}} = \sqrt{\frac{1,419 \cdot 10^{-5}}{\frac{1,51 \cdot 10^{-8}}{7,5^2} + \frac{81 \cdot 10^9 \cdot 8,13 \cdot 10^{-8}}{\pi^2 \cdot 210 \cdot 10^9}}} = 64,173 < 200$$

$$\bar{\lambda}_\omega = \frac{\lambda_\omega}{\lambda_1} = \frac{64,173}{93,9} = 0,683$$

– prostorový vzpěr \rightarrow křivka $b \rightarrow \alpha = 0,34$

$$\phi_\omega = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_\omega - 0,2) + \bar{\lambda}_\omega^2 \right] = 0,5 \cdot [1 + 0,34 \cdot (0,683 - 0,2) + 0,683^2] = 0,786$$

$$\chi_\omega = \frac{1}{\phi_\omega + \sqrt{\phi_\omega^2 - \bar{\lambda}_\omega^2}} = \frac{1}{0,786 + \sqrt{0,786^2 - 0,683^2}} = 0,851$$

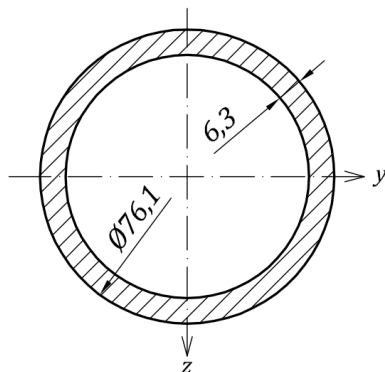
$$N_{b,Rd,\omega} = \frac{\chi_\omega \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0,851 \cdot 3140 \cdot 10^{-6} \cdot 235 \cdot 10^3}{1,0} = 627,953 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,\omega}} = \frac{40,40}{627,953} = 0,064 < 1,0 \quad \dots \quad \text{VYHOVUJE}$$

Dolní pás (vnitřní pole) vazníku z hlediska ztráty stability VYHOVUJE.

3.8.1.4 Diagonála vazníku TR76,1/6,3

Pruty diagonál vazníku budou posuzovány pouze na osově síly, protože účinky posouvajících sil i momentů jsou zanedbatelné.



Průřezové charakteristiky:

$$A = 1380 \text{ mm}^2$$

$$I = 8,48 \cdot 10^5 \text{ mm}^4$$

$$i = 25 \text{ mm}$$

Materiál: Ocel S235JR

$$f_y = 235 \text{ MPa}$$

Vzpěrné délky: - viz kapitola 3.7.2

$$L_{cr} = 2795 \text{ mm}$$

Posouzení pevnosti průřezu

Tah

$$\lambda = \frac{l}{i_{min}} = \frac{2915}{25} = 117 < 400$$

$$N_{t,Rd} = N_{Pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1380 \cdot 10^{-6} \cdot 235 \cdot 10^3}{1,0} = 324,300 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} = \frac{193,39}{324,300} = 0,596 < 1,0 \text{ ... VYHOVUJE}$$

Posouzení stability prvku

Posouzení na vzpěr

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{i} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{2,795}{0,025} \cdot \frac{1}{93,9} = 1,191$$

$$\lambda = \frac{L_{cr}}{i} = \frac{2,915}{0,025} = 117 < 200$$

– kruhový průřez → křivka a → $\alpha = 0,21$

$$\phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] = 0,5 \cdot [1 + 0,21 \cdot (1,191 - 0,2) + 1,191^2] = 1,313$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{1,313 + \sqrt{1,313^2 - 1,191^2}} = 0,536$$

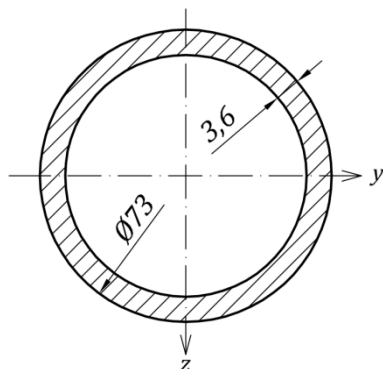
$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0,536 \cdot 1380 \cdot 10^{-6} \cdot 235 \cdot 10^3}{1,0} = 173,825 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{158,25}{173,825} = 0,910 < 1,0 \text{ ... VYHOVUJE}$$

Diagonály vazníku z hlediska pevnosti i ztráty stability VYHOVUJÍ.

3.8.2 Stabilizační pruty TR73/3,6

U stabilizačních prutů je teoreticky uvažováno působení jen osových sil, ale vzhledem k rozpětí prutu má na únosnost značný vliv i ohybový moment od vlastní tíhy. Stabilizační pruty jsou prvky zajišťující stabilitu konstrukce, proto je limitní štíhlost uvažována 250.



Průřezové charakteristiky:

$$A = 785 \text{ mm}^2$$

$$I = 4,74 \cdot 10^5 \text{ mm}^4$$

$$i = 25 \text{ mm}$$

Materiál: Ocel S235JR

$$f_y = 235 \text{ MPa}$$

Vzpěrné délky: - viz kapitola 3.7.3

$$L_{cr} = 6000 \text{ mm}$$

Posouzení pevnosti průřezu

Tah

$$\lambda = \frac{l}{i_{min}} = \frac{6000}{25} = 240 < 250$$

$$N_{t,Rd} = N_{PL,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{785 \cdot 10^{-6} \cdot 235 \cdot 10^3}{1,0} = 184,475 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} = \frac{11,67}{184,475} = 0,063 < 1,0 \text{ ... VYHOVUJE}$$

Stabilizační pruty z hlediska pevnosti VYHOVUJÍ.

Posouzení stability prvku

Posouzení na vzpěr

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{i} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{6,000}{0,025} \cdot \frac{1}{93,9} = 2,556$$

$$\lambda = \frac{L_{cr}}{i} = \frac{6,000}{0,025} = 240 < 250$$

– kruhový průřez → křivka α → $\alpha = 0,21$

$$\phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] = 0,5 \cdot [1 + 0,21 \cdot (2,556 - 0,2) + 2,556^2] = 4,014$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{4,014 + \sqrt{4,014^2 - 2,556^2}} = 0,141$$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0,141 \cdot 785 \cdot 10^{-6} \cdot 235 \cdot 10^3}{1,0} = 26,011 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{20,02}{26,011} = 0,770 < 1,0 \text{ ... VYHOVUJE}$$

Kombinace ohybu a osových sil

Kombinace bude řešena na prutu s označením B302.

$$\begin{aligned} \text{Návrhové vnitřní síly na prutu:} \quad N_{Ed} &= -20,02 \quad kN \\ M_{y,Ed} &= 0,27 \quad kNm \end{aligned}$$

$$\alpha_h = \frac{M_h}{M_s} = \frac{0}{0,27} = 0 \rightarrow \psi = 0 \rightarrow C_{my} = 0,95 + 0,05 \cdot \alpha_h = 0,95 + 0,05 \cdot 0 = 0,95$$

$$k_{yy} = C_{my} \cdot \left(1 + (\bar{\lambda} - 0,2) \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}}\right)$$

$$k_{yy} = 0,95 \cdot \left(1 + (2,556 - 0,2) \cdot \frac{20,02}{0,141 \cdot \frac{184,475}{1,0}}\right) = 2,673$$

$$k_{yy} = 2,673 > c_{my} \cdot \left(1 + 0,8 \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}}\right) = 0,95 \cdot \left(1 + 0,8 \cdot \frac{20,02}{0,141 \cdot \frac{184,475}{1,0}}\right) = 1,535$$

$$k_{zy} = 0,6 \cdot k_{yy} = 0,6 \cdot 1,535 = 0,921$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1$$

$$\frac{20,02}{0,141 \cdot \frac{184,475}{1,0}} + 1,535 \cdot \frac{0,27}{1 \cdot \frac{1,30 \cdot 10^{-5} \cdot 235 \cdot 10^3}{1,0}} + 0 \leq 1$$

$$0,770 + 0,136 + 0 = 0,906 < 1 \quad \dots \quad \text{VYHOVUJE}$$

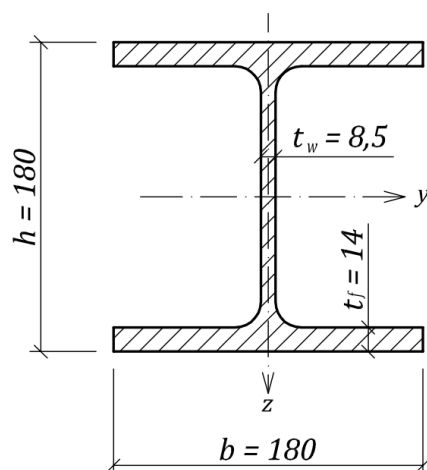
$$\frac{N_{Ed}}{\chi \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1$$

$$\frac{20,02}{0,141 \cdot \frac{184,475}{1,0}} + 0,921 \cdot \frac{0,27}{1 \cdot \frac{1,30 \cdot 10^{-5} \cdot 235 \cdot 10^3}{1,0}} + 0 \leq 1$$

$$0,770 + 0,081 + 0 = 0,851 < 1 \quad \dots \quad \text{VYHOVUJE}$$

Stabilizační pruty z hlediska ztráty stability VYHOVUJÍ.

3.8.3 Sloup HEB180



Průřezové charakteristiky:

A	$=$	6525	mm^2
I_y	$=$	$3,83 \cdot 10^7$	mm^4
I_z	$=$	$1,36 \cdot 10^7$	mm^4
I_w	$=$	$9,37 \cdot 10^{10}$	mm^6
I_t	$=$	$4,22 \cdot 10^5$	mm^4
$W_{pl,y}$	$=$	$4,81 \cdot 10^5$	mm^3
$W_{pl,z}$	$=$	$2,31 \cdot 10^5$	mm^3
i_y	$=$	77	mm
i_z	$=$	46	mm

Materiál: Ocel S235JR

$$E = 210 \text{ GPa}$$

$$f_y = 235 \text{ MPa}$$

Vzpěrné délky: - viz. kapitola 3.7.1

$$L_{cr,y} = 11400 \text{ mm}$$

$$L_{cr,z} = 6000 \text{ mm}$$

Klasifikace průřezu:

$$\varepsilon = \sqrt{235/f_y} = \sqrt{235/235} = 1,0$$

$$c = b/2 - t_w/2 - r = 180/2 - 8,5/2 - 15 = 70,75 \text{ mm}$$

$$d = h - 2t_f - 2r = 180 - 2 \cdot 14 - 2 \cdot 15 = 122 \text{ mm}$$

$$z = \frac{N_{Ed}}{\frac{t_w \cdot f_y}{\gamma_{M0}}} = \frac{109,96 \cdot 10^3}{8,5 \cdot 235} = 55,049 \text{ mm} \rightarrow \text{stojina tlačená a ohýbaná}$$

Stojina:

$$\alpha_c = \frac{d}{2} + \frac{z}{2} = \frac{122}{2} + \frac{54}{2} = 88 \rightarrow \alpha = \frac{\alpha_c}{d} = \frac{88}{122} = 0,72$$

$$\frac{d}{t_w} = \frac{122}{8,5} = 14,35 \leq \frac{396\varepsilon}{13\alpha - 1} = \frac{396 \cdot 1}{13 \cdot 0,72 - 1} = 47,37 \rightarrow 1. \text{ třída}$$

Pásnice:

$$\frac{c}{t_f} = \frac{70,75}{14} = 5,05 \leq 9\varepsilon = 9 \cdot 1 = 9 \rightarrow 1. \text{ třída}$$

Posouzení pevnosti průřezu**Tah**

$$\lambda = \frac{L}{i_{min}} = \frac{6000}{46} = 133 < 400$$

$$N_{t,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{6525 \cdot 10^{-6} \cdot 235 \cdot 10^3}{1,0} = 1533,375 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} = \frac{20,07}{1533,375} = 0,013 < 1,0 \quad \dots \textbf{VYHOVUJE}$$

Ohyb

$$M_{c,Rd} = M_{Pl,Rd} = \frac{W_{Pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{4,81 \cdot 10^{-4} \cdot 235 \cdot 10^3}{1,0} = 113,035 \text{ kNm}$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{56,39}{113,035} = 0,499 < 1,0 \quad \dots \textbf{VYHOVUJE}$$

Smyk

$$V_{Pl,Rd} = \frac{A_{v,z} \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = \frac{1624 \cdot 10^{-6} \cdot 235 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 1,0} = 220,340 \text{ kN}$$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Pl,Rd}} = \frac{57,20}{220,340} = 0,260 < 1 \quad \dots \textbf{VYHOVUJE}$$

$$V_{Ed} = 57,20 \text{ kN} < 0,5 \cdot V_{Pl,Rd} = 0,5 \cdot 220,340 = 110,170 \text{ kN}$$

Účinek posouvací síly je možné zanedbat (vliv smyku je nevýznamný).

Kroucení

Účinek kroucí síly je téměř nulový a proto je možné jej zanedbat.

Sloup z hlediska pevnosti VYHOVUJE.

Posouzení stability prvkuPosouzení na vzpěr

$$\lambda_1 = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = \pi \cdot \sqrt{\frac{210 \cdot 10^9}{235 \cdot 10^6}} = 93,9$$

Kolmo na osu y

$$\bar{\lambda}_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{11,400}{0,077} \cdot \frac{1}{93,9} = 1,577$$

$$\lambda_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} = \frac{11,400}{0,077} = 148 < 200$$

$$\frac{h}{b} = \frac{180}{180} = 1,0 < 1,2 \quad t_f = 14 \text{ mm} < 40 \text{ mm} \quad \rightarrow \quad \text{křivka } b \quad \rightarrow \quad \alpha = 0,34$$

$$\phi_y = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2] = 0,5 \cdot [1 + 0,34 \cdot (1,577 - 0,2) + 1,577^2] = 1,978$$

$$\chi_y = \frac{1}{\phi_y + \sqrt{\phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{1,978 + \sqrt{1,978^2 - 1,577^2}} = 0,315$$

$$N_{b,Rd,y} = \frac{\chi_y \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0,315 \cdot 6525 \cdot 10^{-6} \cdot 235 \cdot 10^3}{1,0} = 483,013 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,y}} = \frac{109,96}{483,013} = 0,228 < 1,0 \quad \dots \quad \text{VYHOVUJE}$$

Kolmo na osu z

$$\bar{\lambda}_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{6,000}{0,046} \cdot \frac{1}{93,9} = 1,389$$

$$\lambda_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} = \frac{6,000}{0,046} = 130 < 200$$

$$\frac{h}{b} = \frac{180}{180} = 1,0 < 1,2 \quad t_f = 14 \text{ mm} < 40 \text{ mm} \quad \rightarrow \quad \text{křivka } c \quad \rightarrow \quad \alpha = 0,49$$

$$\phi_z = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2] = 0,5 \cdot [1 + 0,49 \cdot (1,389 - 0,2) + 1,389^2] = 1,756$$

$$\chi_z = \frac{1}{\phi_z + \sqrt{\phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{1,756 + \sqrt{1,756^2 - 1,389^2}} = 0,353$$

$$N_{b,Rd,z} = \frac{\chi_z \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0,353 \cdot 6525 \cdot 10^{-6} \cdot 235 \cdot 10^3}{1,0} = 541,281 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,z}} = \frac{109,96}{541,281} = 0,203 < 1,0 \quad \dots \quad \text{VYHOVUJE}$$

Klopení

Klopení umožněno pouze při působení záporného ohybového momentu (při tlačené vnitřní pásnici), v opačném případě je klopení bráněno pomocí tuhého stěnového pláště.

Součinitele závislé na typu zatížení budou průměrovány mezi hodnotami pro spojitě zatížení a pro soustředěné zatížení na prutu, jelikož návrhový moment je způsoben zatížením od větru a reakcí od příhradového vazníku.

Součinitele vzpěrné délky: $k_y = 1,90$

$$k_z = k_\omega = 1,0$$

$z_j = 0$... dvouose symetrický průřez

- součinitel působení zatížení vzhledem ke středu smyku:

$$z_g = \frac{h}{2} = \frac{180}{2} = 90 \text{ mm}$$

- bezrozměrný parametr kroucení:

$$k_{\omega t} = \frac{\pi}{k_\omega \cdot l} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot I_\omega}{G \cdot I_t}} = \frac{\pi}{1,0 \cdot 6} \cdot \sqrt{\frac{210 \cdot 10^9 \cdot 9,37 \cdot 10^{-8}}{81 \cdot 10^9 \cdot 4,22 \cdot 10^{-7}}} = 0,398$$

- bezrozměrný parametr nesymetrie průřezu:

$$\zeta_j = \frac{\pi \cdot z_j}{k_z \cdot l} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot I_z}{G \cdot I_t}} = 0$$

- bezrozměrný parametr působení zatížení:

$$\zeta_g = \frac{\pi \cdot z_g}{k_z \cdot l} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot I_z}{G \cdot I_t}} = \frac{\pi \cdot 0,09}{1,0 \cdot 6} \cdot \sqrt{\frac{210 \cdot 10^9 \cdot 1,36 \cdot 10^{-5}}{81 \cdot 10^9 \cdot 4,22 \cdot 10^{-7}}} = 0,431$$

$$k_{wt} = 0,397 \leq C_{1,1} = 1,13 \rightarrow C_1 = C_{1,0} + (C_{1,1} - C_{1,0})$$

$$C_1 = \left(\frac{1,13 + 1,35}{2} \right) + \left(\frac{1,36 + 1,13}{2} - \frac{1,13 + 1,35}{2} \right) = 1,245$$

$$C_2 = 0,505$$

$$C_3 = 0,47$$

- bezrozměrný kritický moment:

$$\mu_{cr} = \frac{C_1}{k_z} \cdot \left[\sqrt{1 + k_{\omega t}^2 + (C_1 \cdot \zeta_g - C_3 \cdot \zeta_j)^2} - (C_2 \cdot \zeta_g - C_3 \cdot \zeta_j) \right]$$

$$\mu_{cr} = \frac{1,245}{1,0} \cdot \left[\sqrt{1 + 0,398^2 + (1,245 \cdot 0,431)^2} - (0,505 \cdot 0,431) \right] = 1,226$$

- kritický moment:

$$M_{cr} = \mu_{cr} \cdot \frac{\pi \cdot \sqrt{E \cdot I_z \cdot G \cdot I_t}}{l}$$

$$M_{cr} = 1,226 \cdot \frac{\pi \cdot \sqrt{210 \cdot 10^9 \cdot 1,36 \cdot 10^{-5} \cdot 81 \cdot 10^9 \cdot 4,22 \cdot 10^{-7}}}{6} = 200,570 \text{ kNm}$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{Pl,y} \cdot f_Y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{4,81 \cdot 10^{-4} \cdot 235 \cdot 10^3}{200,570}} = 0,751$$

– válcovaný I – průřez: $\frac{h}{b} = \frac{180}{180} = 1,0 < 1,2 \rightarrow$ křivka klopení $b \rightarrow \alpha_{LT} = 0,34$

$$\phi_{LT} = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - \lambda_{LT,0}) + \beta \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2 \right]$$

$$\phi_{LT} = 0,5 \cdot [1 + 0,34 \cdot (0,751 - 0,4) + 0,75 \cdot 0,751^2] = 0,771$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2}} = \frac{1}{0,771 + \sqrt{0,771^2 - 0,75 \cdot 0,751^2}} = 0,844$$

- opravný součinitel: $k_c = (0,94 + 0,86)/2 = 0,9$

$$f = 1 - 0,5 \cdot (1 - k_c) \cdot \left[1 - 2 \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - 0,8)^2 \right]$$

$$f = 1 - 0,5 \cdot (1 - 0,86) \cdot [1 - 2 \cdot (0,719 - 0,8)^2] = 0,950 < 1,0$$

- redukovaný součinitel klopení:

$$\chi_{LT,mod} = \frac{\chi_{LT}}{f} = \frac{0,844}{0,950} = 0,888$$

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT,mod} \cdot \frac{W_{Pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = 0,888 \cdot \frac{4,81 \cdot 10^{-4} \cdot 235 \cdot 10^3}{1,0} = 100,375 \text{ kNm}$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} = \frac{56,39}{100,375} = 0,562 < 1,0 \dots \text{VYHOVUJE}$$

Kombinace ohybu, smyku a osové síly

Kombinace bude řešena na prutu s označením B200.

Návrhové vnitřní síly na prutu:	$N_{Ed} =$	-63,92	kN
	$M_{y,Ed} =$	-56,39	kNm
	$M_{z,Ed} =$	0,01	kNm
	$V_{z,Ed} =$	-7,23	kNm

Smyková síla je menší než 50% smykové únosnosti, proto je možné ji zanedbat (viz výše).

Účinek ohybového momentu $M_{z,Ed}$ je téměř nulový, proto bude zanedbán.

$$\alpha_h = \frac{M_h}{M_s} = \frac{0}{56,39} = 0 \rightarrow \psi = 0 \rightarrow C_{my} = 0,925 + 0,10 \cdot \alpha_h = 0,925 + 0,05 \cdot 0 = 0,925$$

$$k_{yy} = C_{my} \cdot (1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}})$$

$$k_{yy} = 0,925 \cdot (1 + (1,577 - 0,2) \cdot \frac{63,92}{0,315 \cdot \frac{1533,375}{1,0}}) = 1,094$$

$$k_{yy} = 1,094 > c_{my} \cdot (1 + 0,8 \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}}) = 0,925 \cdot (1 + 0,8 \cdot \frac{63,92}{0,353 \cdot \frac{1533,375}{1,0}}) = 1,012$$

$$k_{zy} = 0,6 \cdot k_{yy} = 0,6 \cdot 1,012 = 0,607$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1$$

$$\frac{63,92}{0,315 \cdot \frac{1533,375}{1,0}} + 1,012 \cdot \frac{56,39}{0,888 \cdot \frac{113,035}{1,0}} + 0 \leq 1$$

$$0,132 + 0,569 + 0 = 0,701 < 1 \quad \dots \quad \textbf{VYHOVUJE}$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1$$

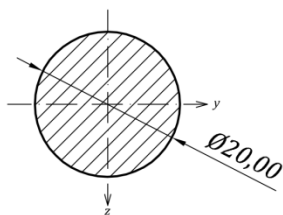
$$\frac{63,92}{0,353 \cdot \frac{1533,375}{1,0}} + 0,607 \cdot \frac{56,39}{0,888 \cdot \frac{113,035}{1,0}} + 0 \leq 1$$

$$0,118 + 0,341 + 0 = 0,459 < 1 \quad \dots \quad \textbf{VYHOVUJE}$$

Sloup z hlediska ztráty stability **VYHOVUJE**.

3.8.4 Stěnové ztužení KR20

U prutů stěnového ztužení je uvažováno namáhání pouze tahovými silami. Pruty budou do konstrukce osazeny s dopínacími maticemi, proto není třeba uvažovat s limitní štíhlostí. Posudek prutu bude proveden v místě oslabení závitem u dopínací matice.



Průřezové charakteristiky:

$$A_s = 245 \text{ mm}^2$$

Materiál: Ocel S235JR

$$f_y = 235 \text{ MPa}$$

Posouzení pevnosti průřezu

Tah

$$N_{t,Rd} = N_{PL,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{245 \cdot 10^{-6} \cdot 235 \cdot 10^3}{1,0} = 57,575 \text{ kN}$$

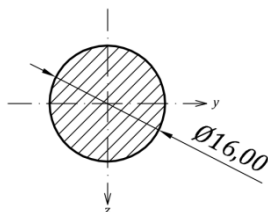
$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} = \frac{26,75}{57,575} = 0,467 < 1,0 \text{ ...VYHOVUJE}$$

Garantovaná tahová únosnost dopínací matice dle výrobce: $F_p = 27 \text{ kN} > N_{Ed} = 26,75 \text{ kN}$

Stěnové ztužení z hlediska pevnosti VYHOVUJE.

3.8.5 Střešní ztužení KR16

U prutů střešního ztužení je uvažováno namáhání pouze tahovými silami. Pruty budou do konstrukce osazeny s dopínacími maticemi, proto není třeba uvažovat s limitní štíhlostí. Posudek prutu bude proveden v místě oslabení závitem u dopínací matice.



Průřezové charakteristiky:

$$A_s = 157 \text{ mm}^2$$

Materiál: Ocel S235JR

$$f_y = 235 \text{ MPa}$$

Posouzení pevnosti průřezu

Tah

$$N_{t,Rd} = N_{PL,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{157 \cdot 10^{-6} \cdot 235 \cdot 10^3}{1,0} = 36,895 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} = \frac{16,61}{36,895} = 0,450 < 1,0 \text{ ...VYHOVUJE}$$

Garantovaná tahová únosnost dopínací matice dle výrobce: $F_p = 17,7 \text{ kN} > N_{Ed} = 16,61 \text{ kN}$

Střešní ztužení z hlediska pevnosti VYHOVUJE.

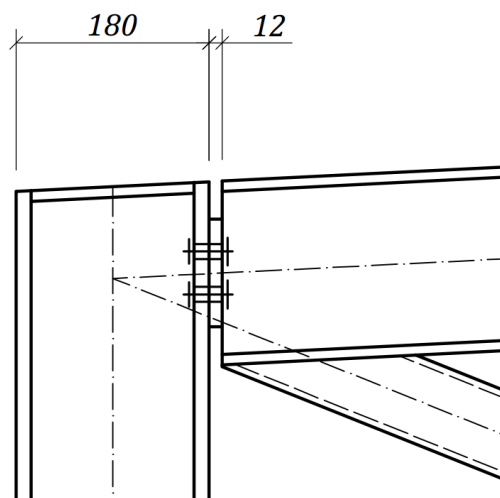
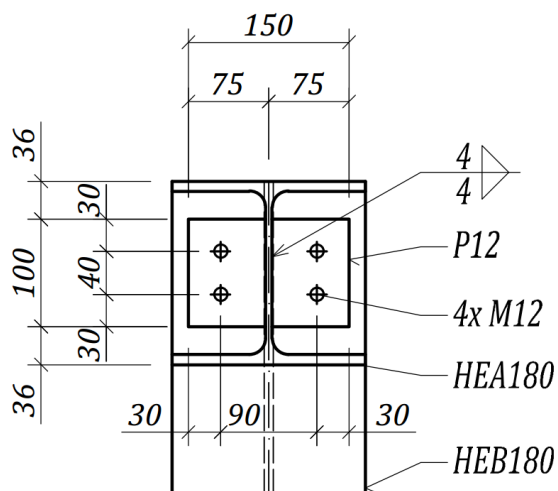
3.8.6 Srovnání početního řešení a posudků ze softwaru SCIA Engineer

V tabulce níže je proveden souhrn a srovnání maximálního využití únosnosti jednotlivých prvků konstrukce. Srovnání je provedeno mezi posudky z početního řešení a posudky ze softwaru SCIA Engineer.

PRVEK		PRŮŘEZ	VYUŽITÍ [%]	
			Početní řešení	SCIA Engineer
Vazník	Horní pás	HEA 180	88	86
	Dolní pás – krajní pole	HEA 160	35	36
	Dolní pás – prostřední pole	HEA 140	46	46
	Diagonály	TR 76,1/6,3	91	90
Stabilizační pruty		TR 73/3,6	91	91
Sloup		HEB 180	70	72
Stěnové ztužení		KR 20	47	47
Střešní ztužení		KR 16	45	45

3.9 Posouzení vybraných detailů na MSÚ

3.9.1 Přípoj horního pásu vazníku na sloup



3.9.1.1 Posouzení šroubů

Návrh:

Šrouby: $4 \times M12 \rightarrow d = 12 \text{ mm}$
 $d_0 = 14 \text{ mm}$
 $d_m = 20,5 \text{ mm}$
 $A_s = 84,3 \text{ mm}^2$
 $A = 113 \text{ mm}^2$

Materiál: 8.8 $\rightarrow f_u = 640 \text{ MPa}$
 $f_{ub} = 800 \text{ MPa}$

Rozteče: $e_1 = 30 \text{ mm}$ $p_1 = 40 \text{ mm}$
 $e_2 = 30 \text{ mm}$ $p_2 = 90 \text{ mm}$

Návrhové zatížení přípoje

$V_{Ed} = 99,83 \text{ kN}$

$$F_{v,Ed} = \frac{V_{Ed}}{n_b} = \frac{99,700}{4} = 24,958 \text{ kN}$$

$N_{Ed} = 57,20 \text{ kN}$

$$F'_{t,Ed} = \frac{N_{Ed}}{n_b} = \frac{57,20}{4} = 14,300 \text{ kN}$$

Přídavné namáhání od páčení (zjednodušená metoda dle ČSN 73 1401 ^[14])

$$t_e = 4,3 \cdot \sqrt[3]{\frac{b \cdot d^2}{a}} = 4,3 \cdot \sqrt[3]{\frac{42 \cdot 12^2}{30}} = 25,213$$

$t = 12 \text{ mm} < t_e = 25,213 \text{ mm} \rightarrow$ zvýšení tahové síly součinitelem páčení γ_p

$$\gamma_p = 1 + 0,005 \cdot \frac{t_e^3 - t^3}{d^2} = 1 + 0,005 \cdot \frac{25,213^3 - 12^3}{12^2} = 1,497$$

$$F_{t,Ed} = F'_{t,Ed} \cdot \gamma_p = 14,30 \cdot 1,497 = 21,407 \text{ kN}$$

Únosnost ve střihu

$$F_{v,Rd} = n \cdot \frac{0,6 \cdot f_{ub} \cdot A}{\gamma_{M2}} = 1 \cdot \frac{0,6 \cdot 800 \cdot 113}{1,25} = 43,392 \text{ kN}$$

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} = \frac{24,958}{43,392} = 0,575 \dots \text{ VYHOVUJE}$$

Únosnost v otlačení

$$t = \min \left\{ \begin{matrix} 12 \\ 14 \end{matrix} \right\} = 12 \text{ mm}$$

$$k_1 = \min \left\{ \begin{matrix} 2,8 \cdot e_1/d_0 - 1,7 = 2,8 \cdot 30/14 - 1,7 = 4,3 \\ 2,5 \end{matrix} \right\} = 2,5$$

$$\alpha = \min \left\{ \begin{matrix} e_1/3d_0 = 30/3 \cdot 14 = 0,714 \\ f_{ub}/f_u = 640/800 = 0,800 \\ 1,0 \end{matrix} \right\} = 0,714$$

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 \cdot 0,714 \cdot 640 \cdot 12 \cdot 12}{1,25} = 131,604 \text{ kN}$$

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{b,Rd}} = \frac{24,958}{131,604} = 0,190 \dots \text{ VYHOVUJE}$$

Únosnost v tahu

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 800 \cdot 84,3}{1,25} = 48,557 \text{ kN}$$

$$\frac{F_{t,Ed}}{F_{t,Rd}} = \frac{21,407}{48,557} = 0,441 \dots \text{ VYHOVUJE}$$

Únosnost při protlačení

$$B_{p,Rd} = \frac{0,6 \cdot \pi \cdot d_m \cdot t_p \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 \cdot \pi \cdot 20,6 \cdot 12 \cdot 640}{1,25} = 238,572 \text{ kN}$$

$$\frac{F_{t,Ed}}{B_{p,Rd}} = \frac{21,407}{238,572} = 0,090 \dots \text{ VYHOVUJE}$$

Kombinace smyku a tahu

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 \cdot F_{t,Rd}} = 0,575 + \frac{0,441}{1,4} = 0,890 < 1 \dots \text{ VYHOVUJE}$$

Šroubový přípoj čelní desky VYHOVUJE.

3.9.1.2 Posouzení svaruNávrhové zatížení přípoje

$$V_{Ed} = 99,83 \text{ kN}$$

$$N_{Ed} = 57,20 \text{ kN}$$

Únosnost koutového svaru

$$A_v = 2 \cdot 4 \cdot 100 = 800 \text{ mm}^2$$

$$\tau_{\parallel} = \frac{V_{Ed}}{A_v} = \frac{99,83 \cdot 10^3}{800} = 124,788 \text{ MPa}$$

$$\sigma_N = \frac{N_{Ed}}{A_v} = \frac{57,20 \cdot 10^3}{800} = 71,500 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{\sigma_M}{\sqrt{2}} = \frac{71,500}{\sqrt{2}} = 50,558 \text{ MPa}$$

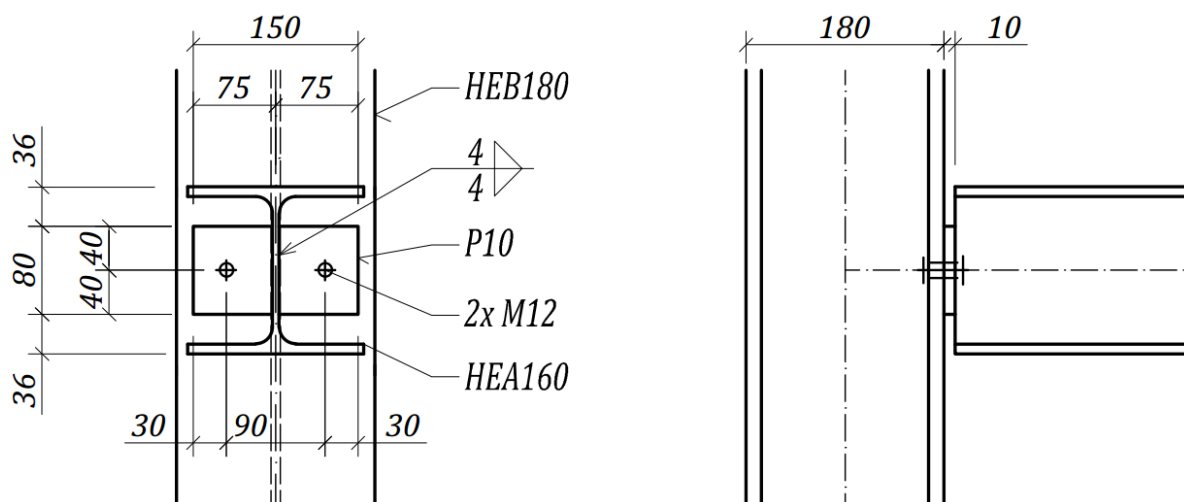
$$\sigma_{\perp} = 50,558 \text{ MPa} < \frac{f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{360}{1,25} = 288 \text{ MPa}$$

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}}$$

$$\sqrt{50,558^2 + 3 \cdot (50,558^2 + 124,788^2)} = 238,622 \text{ MPa} < \frac{360}{0,8 \cdot 1,25} = 360 \text{ MPa}$$

Svarový přípoj čelní desky VYHOVUJE.

3.9.2 Přípoj dolního pásu vazníku na sloup



3.9.2.1 Posouzení šroubů

Návrh:

Šrouby: $2 \times M12 \rightarrow d = 12 \text{ mm}$
 $d_0 = 14 \text{ mm}$
 $d_m = 20,5 \text{ mm}$
 $A_s = 84,3 \text{ mm}^2$
 $A = 113 \text{ mm}^2$

Materiál: 8.8 $\rightarrow f_u = 640 \text{ MPa}$
 $f_{ub} = 800 \text{ MPa}$

Rozteče: $e_1 = 40 \text{ mm}$
 $e_2 = 30 \text{ mm} \quad p_2 = 90 \text{ mm}$

Návrhové zatížení přípoje

$V_{Ed} = -0,96 \text{ kN}$ Pozn: Vliv posouvající síly je zanedbatelný.

$N_{Ed} = 42,26 \text{ kN}$

$$F'_{t,Ed} = \frac{N_{Ed}}{n_b} = \frac{42,26}{2} = 21,13 \text{ kN}$$

Přídavné namáhání od páčení (zjednodušená metoda dle ČSN 73 1401 ^[14])

$$t_e = 4,3 \cdot \sqrt[3]{\frac{b \cdot d^2}{a}} = 4,3 \cdot \sqrt[3]{\frac{42 \cdot 12^2}{30}} = 25,213$$

$t = 10 \text{ mm} < t_e = 25,213 \text{ mm} \rightarrow$ zvýšení tahové síly součinitelem páčení γ_p

$$\gamma_p = 1 + 0,005 \cdot \frac{t_e^3 - t^3}{d^2} = 1 + 0,005 \cdot \frac{25,213^3 - 10^3}{12^2} = 1,522$$

$$F_{t,Ed} = F'_{t,Ed} \cdot \gamma_p = 21,13 \cdot 1,522 = 32,160 \text{ kN}$$

Únosnost v tahu

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 800 \cdot 84,3}{1,25} = 48,557 \text{ kN}$$

$$\frac{F_{t,Ed}}{F_{t,Rd}} = \frac{32,160}{48,557} = 0,662 \dots \text{ VYHOVUJE}$$

Únosnost při protlačení

$$B_{p,Rd} = \frac{0,6 \cdot \pi \cdot d_m \cdot t_p \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 \cdot \pi \cdot 20,6 \cdot 12 \cdot 640}{1,25} = 238,572 \text{ kN}$$

$$\frac{F_{t,Ed}}{B_{p,Rd}} = \frac{32,160}{238,572} = 0,135 \dots \text{ VYHOVUJE}$$

Šroubový přípoj čelní desky VYHOVUJE.

3.9.2.2 Posouzení svaru

Návrhové zatížení přípoje

$$V_{Ed} = -0,96 \text{ kN} \quad \text{Pozn: Vliv posouvající síly je zanedbatelný.}$$

$$V_{Ed} = -62,80 \text{ kN}$$

Únosnost koutového svaru

$$A_v = 2 \cdot 4 \cdot 80 = 640 \text{ mm}^2$$

$$\sigma_N = \frac{N_{Ed}}{A_v} = \frac{62,8 \cdot 10^3}{640} = 98,125 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{\sigma_M}{\sqrt{2}} = \frac{98,125}{\sqrt{2}} = 69,385 \text{ MPa}$$

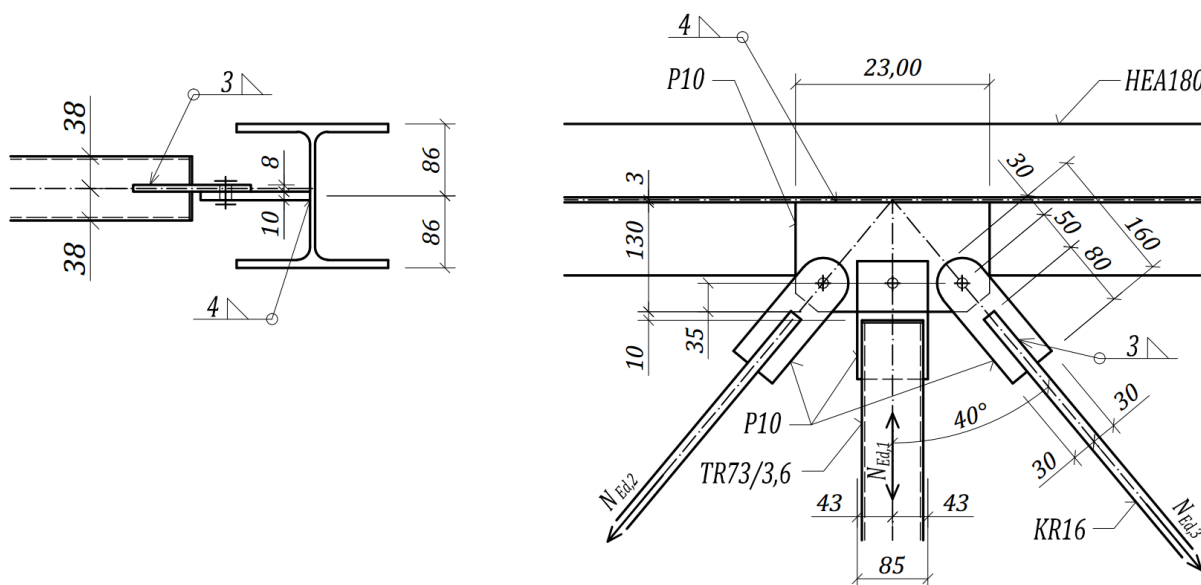
$$\sigma_{\perp} = 69,385 \text{ MPa} < \frac{f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{360}{1,25} = 288 \text{ MPa}$$

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}}$$

$$\sqrt{69,385^2 + 3 \cdot (69,385^2 + 0)} = 138,77 \text{ MPa} < \frac{360}{0,8 \cdot 1,25} = 360 \text{ MPa}$$

Svarový přípoj čelní desky VYHOVUJE.

3.9.3 Přípoj stabilizačního prutu a střešního ztužení na krajní vazník



3.9.3.1 Posouzení šroubů

Návrh:

Šrouby: $1 \times M12 \rightarrow d = 12 \text{ mm}$
 $d_0 = 14 \text{ mm}$
 $A = 113 \text{ mm}^2$

Materiál: 8.8 $\rightarrow f_u = 360 \text{ MPa}$
 $f_{ub} = 800 \text{ MPa}$

Rozteče: $e_1 = 30 \text{ mm}$
 $e_2 = 30 \text{ mm}$

Návrhové zatížení přípoje

Pro vyvození maximálních účinků na svar bude uvažován teoretický stav zatížení s oběma taženými ztužidly.

$$F_{t,Ed} = \max \begin{cases} N_{Ed,1} = -20,02 \\ N_{Ed,1} = 11,61 \\ N_{Ed,2,3} = 16,61 \end{cases} = 20,02 \text{ kN}$$

Únosnost ve střihu

$$F_{v,Rd} = n \cdot \frac{0,6 \cdot f_{ub} \cdot A}{\gamma_{M2}} = 1 \cdot \frac{0,6 \cdot 800 \cdot 113}{1,25} = 43,392 \text{ kN}$$

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} = \frac{20,02}{43,392} = 0,461 \dots \text{ VYHOVUJE}$$

Únosnost v otláčení

$$t = \min \left\{ \begin{matrix} 8 \\ 10 \end{matrix} \right\} = 8 \text{ mm}$$

$$k_1 = \min \left\{ \begin{matrix} 2,8 \cdot e_1/d_0 - 1,7 = 2,8 \cdot 30/14 - 1,7 = 4,3 \\ 2,5 \end{matrix} \right\} = 2,5$$

$$\alpha = \min \left\{ \begin{matrix} e_1/3d_0 = 30/3 \cdot 14 = 0,714 \\ f_{ub}/f_u = 640/800 = 0,800 \\ 1,0 \end{matrix} \right\} = 0,714$$

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 \cdot 0,714 \cdot 360 \cdot 12 \cdot 8}{1,25} = 49,352 \text{ kN}$$

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{b,Rd}} = \frac{20,02}{49,352} = 0,407 \dots \text{ VYHOVUJE}$$

Šroubový přípoj stabilizačního prutu a střešního ztužení **VYHOVUJE**.

3.9.3.2 Posouzení svaru styčnickové deskyNávrhové zatížení přípoje

$$N_{Ed} = N_{Ed,1} + 2 \cdot N_{Ed2,3} \cdot \cos \alpha = 11,67 + 2 \cdot 16,61 \cdot \cos 40^\circ = 36,429 \text{ kN}$$

Únosnost koutového svaru styčnickové desky

$$A_v = 2 \cdot 4 \cdot 230 = 1840 \text{ mm}^2$$

$$\sigma_N = \frac{N_{Ed}}{A_v} = \frac{36,429 \cdot 10^3}{1840} = 19,798 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{\sigma_M}{\sqrt{2}} = \frac{19,798}{\sqrt{2}} = 13,999 \text{ MPa}$$

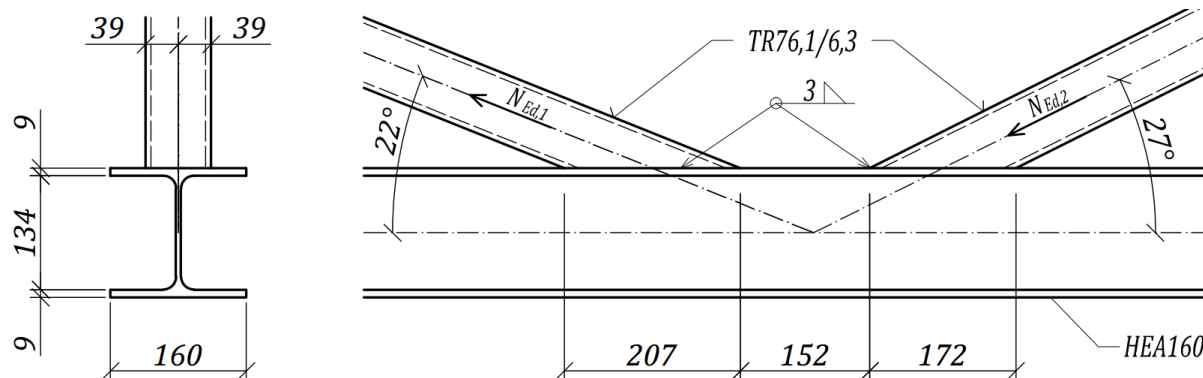
$$\sigma_{\perp} = 13,999 \text{ MPa} < \frac{f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{360}{1,25} = 288 \text{ MPa}$$

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}}$$

$$\sqrt{13,999^2 + 3 \cdot (13,999^2 + 0)} = 27,998 \text{ MPa} < \frac{360}{0,8 \cdot 1,25} = 360 \text{ MPa}$$

Svarový přípoj styčnickové desky **VYHOVUJE**.

3.9.4 Připoj diagonál na dolní pás vazníku



Dolní pás HEA160: $b_0 = 160 \text{ mm}$

$$t_0 = 9 \text{ mm}$$

$$A_0 = 3380 \text{ mm}^2$$

Diagonály TR76,1/6,36: $d_1 = d_2 = 76,1 \text{ mm}$

$$t_1 = t_2 = 6,3 \text{ mm}$$

Návrhové zatížení přípoje

$$N_{Ed,0} = 62,80 \text{ kN}$$

$$N_{Ed,1} = 193,38 \text{ kN}$$

$$N_{Ed,1} = -158,25 \text{ kN}$$

3.9.4.1 Únosnost styčnicku

Podmínky platnosti:

$$0,4 < \frac{d_i}{b_0} = \frac{76,1}{160} = 0,476 < 0,8$$

$$\frac{d_i}{t_i} = \frac{76,1}{6,3} = 12,079 < 50$$

Porušení povrchu pásu

$$\sigma_{0,Ed} = \frac{N_{0,Ed}}{A_0} = \frac{62,80 \cdot 10^3}{3380} = 18,580 \text{ MPa}$$

$$n = \frac{\sigma_{0,Ed}}{f_{y,0} \cdot \gamma_{M5}} = \frac{18,58}{235 \cdot 1,0} = 0,079$$

$$\beta = \frac{d_1 + d_2}{2 \cdot b_0} = \frac{76,1 \cdot 2}{2 \cdot 160} = 0,476$$

$$k_n = 1,3 - \frac{0,4 \cdot n}{\beta} = 1,3 - \frac{0,4 \cdot 0,079}{0,476} = 1,234$$

$$\gamma = \frac{b_o}{2 \cdot t_o} = \frac{160}{2 \cdot 9} = 8,889$$

$$N_{Rd,i} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{8,9 \cdot k_n \cdot f_{y,0} \cdot t_0^2 \cdot \sqrt{\gamma} \cdot \frac{d_1 + d_2}{2 \cdot b_0}}{\gamma_{M5}}$$

$$N_{Rd,1} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{8,9 \cdot 1,234 \cdot 235 \cdot 9^2 \cdot \sqrt{8,889} \cdot \frac{2 \cdot 76,1}{2 \cdot 160}}{\gamma_{M5}} = 621,532 \text{ kN}$$

$$N_{Rd,2} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{8,9 \cdot 1,234 \cdot 235 \cdot 9^2 \cdot \sqrt{8,889} \cdot \frac{2 \cdot 76,1}{2 \cdot 160}}{\gamma_{M5}} = 512,852 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed,1}}{N_{Rd,1}} = \frac{193,39}{621,532} = 0,311 \quad \dots \quad \textbf{VYHOVUJE}$$

$$\frac{N_{Ed,2}}{N_{Rd,2}} = \frac{158,25}{512,852} = 0,309 \quad \dots \quad \textbf{VYHOVUJE}$$

Porušení mezipásových prutů

$$b_{eff} = \frac{10}{b_0/t_0} \cdot \frac{f_{y,0} \cdot t_0}{f_{y,1} \cdot t_{1,2}} \cdot \frac{d_{1,2}}{\gamma_{M5}} = \frac{10}{\frac{160}{9}} \cdot \frac{235 \cdot 9}{235 \cdot 6,3} \cdot \frac{76,1}{1,0} = 61,15 \text{ mm}$$

$$N_{Rd1} = N_{Rd2} = \frac{f_{y,1} \cdot t_1 \cdot (2 \cdot d_1 - 4 \cdot t_1 + d_1 + b_{eff})}{\gamma_{M5}}$$

$$N_{Rd1} = N_{Rd2} = \frac{235 \cdot 6,3 \cdot (2 \cdot 76,1 - 4 \cdot 6,3 + 76,1 + 61,15)}{1,0} = 391,222 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed,1}}{N_{Rd,1}} = \frac{193,39}{391,222} = 0,494 \quad \dots \quad \textbf{VYHOVUJE}$$

$$\frac{N_{Ed,2}}{N_{Rd,2}} = \frac{158,25}{512,852} = 0,405 \quad \dots \quad \textbf{VYHOVUJE}$$

Únosnost styčnicku **VYHOVUJE**.

3.9.4.2 Únosnost svaru

Posuzován svar diagonály s nejvyšší osovou silou.

Svar ve tvaru elipsy \rightarrow délka svaru $l_v \rightarrow a = 207 \text{ mm}$

$$b = 76 \text{ mm}$$

$$l_v = \pi \cdot \left[\frac{3}{2} \cdot (a + b) - \sqrt{a \cdot b} \right] = \pi \cdot \left[\frac{3}{2} \cdot (207 + 76) - \sqrt{207 \cdot 76} \right] = 940 \text{ mm}$$

$$A_v = a_v \cdot l_v = 3 \cdot 940 = 2820 \text{ mm}^2$$

$$\sigma_N = \frac{N_{Ed}}{A_v} = \frac{193,39 \cdot 10^3}{2820} = 65,578 \text{ MPa}$$

$$\tau_{\parallel} = \sigma_N \cdot \cos \theta = 65,578 \cdot \cos 22^\circ = 60,803 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{\sigma_N \cdot \sin 22^\circ}{\sqrt{2}} = \frac{65,578 \cdot \sin 22^\circ}{\sqrt{2}} = 17,371 \text{ MPa}$$

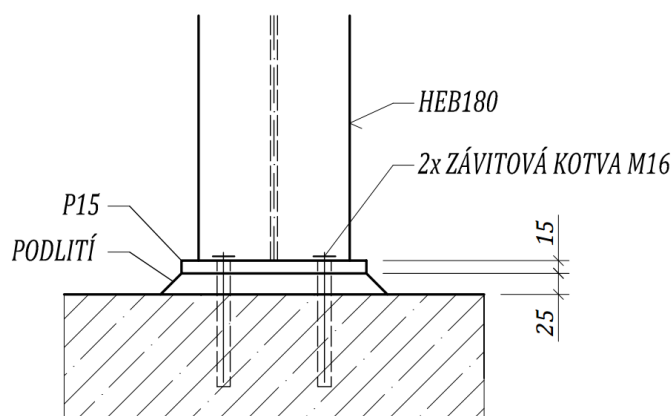
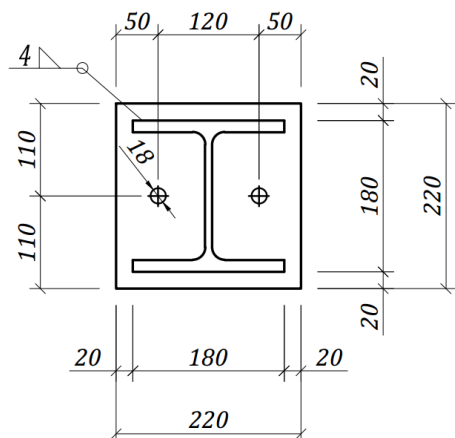
$$\sigma_{\perp} = 17,371 \text{ MPa} < \frac{f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{360}{1,25} = 288 \text{ MPa}$$

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}}$$

$$\sqrt{17,371^2 + 3 \cdot (17,371^2 + 60,803^2)} = 110,896 \text{ MPa} < \frac{360}{0,8 \cdot 1,25} = 360 \text{ MPa}$$

Svarový přípoj diagonály vazníku **VYHOVUJE**.

3.9.5 Kotvení sloupu



Sloup HEB180: $h_c = b_c = 180 \text{ mm}$

$$t_{wc} = 8,5 \text{ mm}$$

$$t_{fc} = 14 \text{ mm}$$

Patní deska: $h_p = b_p = 220 \text{ mm}$

$$t_p = 15 \text{ mm}$$

Kotevní šrouby: Závítová kotva M16 + matice + podložka

3.9.5.1 Rozměry a charakteristiky základu

$$b_f = 1,5 \cdot b_p = 1,5 \cdot 220 = 330 \text{ mm}$$

$$h_f = 1,5 \cdot h_p = 1,5 \cdot 220 = 330 \text{ mm}$$

$$d_f = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{b_f \cdot h_f}{b_f + h_f} = \frac{330 \cdot 330}{330 + 330} = 165 \\ \frac{3 \cdot b_p \cdot h_p}{2 \cdot b_p + 2 \cdot h_p} = \frac{3 \cdot 220 \cdot 220}{2 \cdot 220 + 2 \cdot 220} = 165 \end{array} \right\} = 165 \text{ mm}$$

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 1,0 \cdot \frac{25}{1,5} = 16,67 \text{ MPa}$$

$$\alpha = 1,5$$

$$\beta_j = 2/3$$

$$f_{jd} = \beta_j \cdot \alpha \cdot f_{cd} = 2/3 \cdot 1,5 \cdot 16,67 = 16,67 \text{ MPa}$$

Podlití: – návrh: $25 \text{ mm} > 0,1 \cdot \min(b_p; h_p) = 0,1 \cdot 220 = 22 \text{ mm}$

$$< 0,2 \cdot \min(b_p; h_p) = 0,2 \cdot 220 = 44 \text{ mm}$$

3.9.5.2 Posouzení v úrovni patní desky a základu

Přídavná nosná šířka desky:

$$c_1 = t_{wc} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{3 \cdot f_{td} \cdot \gamma_{Mo}}} = 8,5 \cdot \sqrt{\frac{235}{3 \cdot 16,67 \cdot 1,0}} = 18,43 \text{ mm}$$

$$c_2 = t_{fc} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{3 \cdot f_{td} \cdot \gamma_{Mo}}} = 14 \cdot \sqrt{\frac{235}{3 \cdot 16,67 \cdot 1,0}} = 30,35 \text{ mm}$$

Zatížení v patní spáře:

$$\text{Maximální tlaková reakce:} \quad N_{Ed} = -109,96 \text{ kN} \quad V_{Ed} = -6,87 \text{ kN}$$

$$\text{Maximální tahová reakce:} \quad N_{Ed} = 20,07 \text{ kN} \quad V_{Ed} = -6,71 \text{ kN}$$

$$\text{Maximální vodorovná reakce:} \quad N_{Ed} = -61,86 \text{ kN} \quad V_{Ed} = 57,20 \text{ kN}$$

Únosnost patní desky v tlaku

$$N_{j,Rd} = 2 \cdot [b_p \cdot (c_2 + t_{fc} + 25)] \cdot f_{jd} + [h_c - (c_2 + 2 \cdot t_{fc})] \cdot (2 \cdot c_1 + t_{wc}) \cdot f_{jd}$$

$$N_{j,Rd} = 2 \cdot [220 \cdot (30 + 14 + 25)] \cdot 16,67 + [200 - (30 + 2 \cdot 14)] \cdot (2 \cdot 18 + 8,5) \cdot 16,67$$

$$N_{j,Rd} = 463,276 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{j,Rd}} = \frac{109,96}{463,276} = 0,237 < 1,0 \quad \dots \quad \text{VYHOVUJE}$$

Únosnost patní desky ve smyku

$$F_{v,Rd} = F_{f,Rd} = c_{f,d} \cdot N_{c,Ed} = 0,2 \cdot 61,86 = 12,372 \text{ kN}$$

$$\frac{V_{Ed}}{F_{v,Rd}} = \frac{57,20}{12,372} = 4,62 > 1,0 \quad \dots \quad \text{NEVYHOVUJE}$$

Posouvající sílu je nutné zachytit kotevními šrouby.

Únosnost kotevních šroubů ve smyku

$$\text{Garantovaná smyková únosnost dle výrobce kotev:} \quad V_{Rd} = 31,4 \text{ kN}$$

$$V_{Ed,1} = \frac{V_{Ed}}{n} = \frac{57,20}{2} = 28,600 \text{ kN}$$

$$\frac{V_{Ed,1}}{V_{Rd}} = \frac{28,6}{31,4} = 0,911 < 1 \quad \dots \quad \text{VYHOVUJE}$$

Únosnost kotevních šroubů v tahu

Garantovaná tahová únosnost dle výrobce kotev: $N_{Rd} = 18,8 \text{ kN}$

$$N_{Ed,1} = \frac{N_{Ed}}{n} = \frac{20,07}{2} = 10,035 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed,1}}{N_{Rd}} = \frac{10,035}{18,8} = 0,534 < 1 \quad \dots \quad \textbf{VYHOVUJE}$$

Únosnost kotevních šroubů při protlačení

$$N_{Ed,1} = \frac{N_{Ed}}{n} = \frac{20,07}{2} = 10,035 \text{ kN}$$

$$B_{p,Rd} = \frac{0,6 \cdot \pi \cdot d_m \cdot t_p \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 \cdot \pi \cdot 25,9 \cdot 15 \cdot 360}{1,25} = 210,904 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed,01}}{B_{p,Rd}} = \frac{10,035}{210,904} = 0,048 \quad \dots \quad \textbf{VYHOVUJE}$$

3.9.5.3 Posouzení přípoje patní deskyÚnosnost koutového svaru

Posouzení pro maximální tlakovou reakci:

$$A_v = 2 \cdot 5 \cdot 122 = 1220 \text{ mm}^2$$

$$\tau_{\parallel} = \frac{V_{Ed}}{A_v} = \frac{6,87 \cdot 10^3}{1220} = 5,631 \text{ MPa}$$

$$A_v = 2 \cdot 5 \cdot 122 + 2 \cdot 5 \cdot 180 + 4 \cdot 5 \cdot 70 = 4220 \text{ mm}^2$$

$$\sigma_N = \frac{N_{Ed}}{A} = \frac{109,96 \cdot 10^3}{4220} = 26,057 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{\sigma_M}{\sqrt{2}} = \frac{26,057}{\sqrt{2}} = 18,425 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\perp} = 18,425 \text{ MPa} < \frac{f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{360}{1,25} = 288 \text{ MPa}$$

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}}$$

$$\sqrt{18,425^2 + 3 \cdot (18,425^2 + 5,631^2)} = 38,119 \text{ MPa} < \frac{360}{0,8 \cdot 1,25} = 360 \text{ MPa}$$

Posouzení pro maximální vodorovnou reakci:

$$A_v = 1220 \text{ mm}^2$$

$$\tau_{\parallel} = \frac{V_{Ed}}{A_v} = \frac{57,20 \cdot 10^3}{1220} = 46,885 \text{ MPa}$$

$$A_v = 4220 \text{ mm}^2$$

$$\sigma_N = \frac{N_{Ed}}{A} = \frac{61,86 \cdot 10^3}{4220} = 14,659 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{\sigma_M}{\sqrt{2}} = \frac{14,659}{\sqrt{2}} = 10,365 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\perp} = 10,365 \text{ MPa} < \frac{f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{360}{1,25} = 288 \text{ MPa}$$

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}}$$

$$\sqrt{10,365^2 + 3 \cdot (10,365^2 + 46,885^2)} = 83,811 \text{ MPa} < \frac{360}{0,8 \cdot 1,25} = 360 \text{ MPa}$$

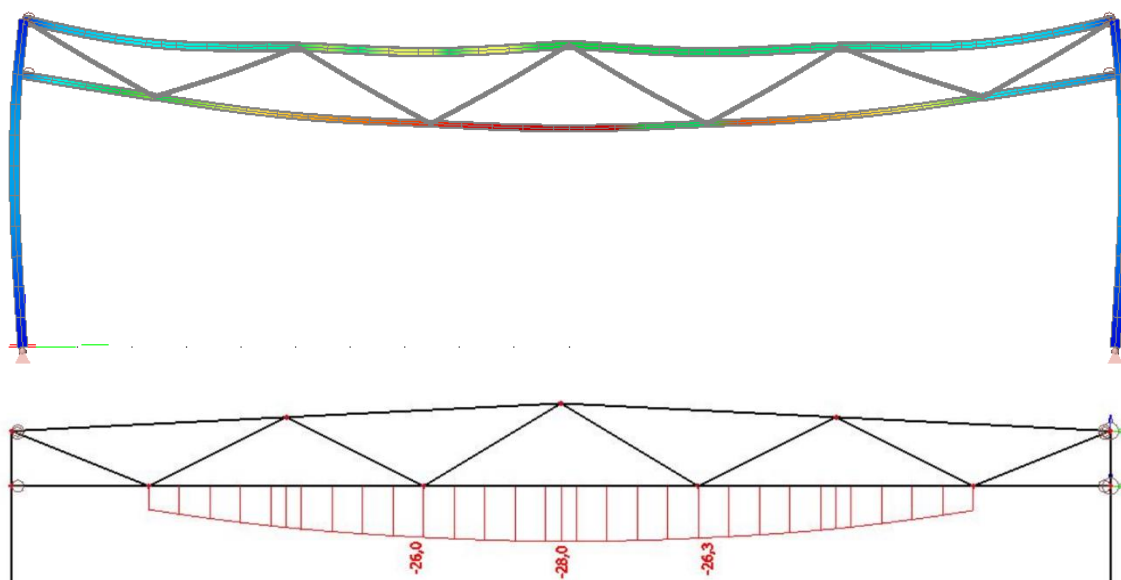
Přípoj patní desky **VYHOVUJE.**

3.10 Posouzení konstrukce na MSP

Mezní stav použitelnosti je posuzován na globálním modelu konstrukce. Deformace konstrukce jsou převzaty ze softwaru SCIA Engineer.

Svislý průhyb vazníku

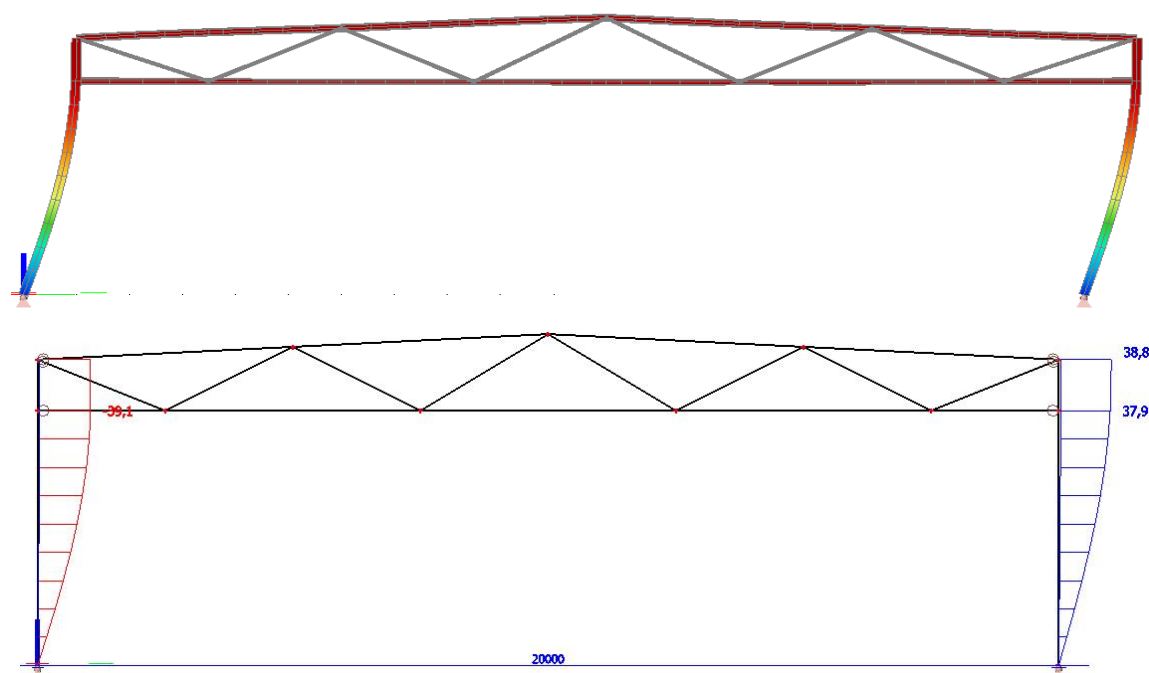
- svislý průhyb: $u_z = 28 \text{ mm} < L/250 = 20000/250 = 80 \text{ mm}$



Obr. 3.18 – Svislý průhyb vazníku

Vodorovný posun vrcholu sloupu

- vodorovný posun: $u_y = 39,1 \text{ mm} < h/150 = 6500/150 = 43,33 \text{ mm}$



Obr. 3.19 – Vodorovný posun vrcholu sloupu

4 ZÁVĚR

Úkolem této práce bylo především srovnání přesnosti stabilitního výpočtu prováděného různými metodami a dle různých postupů. Srovnání bylo provedeno na izolovaných prvcích i globálním modelu reálné konstrukce.

Výsledkem tohoto srovnání je zjištění, že výpočty pomocí analytických metod i softwarových řešení jsou přibližně shodné. Odchyly u jednodušších konstrukcí se pohybují v rozmezí 5%, což je relativně přijatelný výsledek. Ale zároveň je třeba brát v úvahu postupné zvyšování odchylky u složitějších a staticky náročnějších konstrukcí, kde může být problematické především určení vzpěrné délky jednotlivých prutů.

Seznam použité literatury

- [1.] **ŠMÍŘÁK, Svatopluk.** *Pružnost a plasticita I.* 3. vyd. Brno : Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2006. str. 213. 80-7204-468-0.
- [2.] **PILGR, Milan.** <http://www.fce.vutbr.cz/kdk/pilgr.m/>. [Online]
http://www.fce.vutbr.cz/kdk/pilgr.m/BO02/BO02_cvi_09.pdf.
- [3.] **PIJÁK, Jiří.** *Studie stabilitních problémů prutových soustav.* Brno, 2015. str. 64. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební mechaniky. Vedoucí práce Ing. Rostislav Zídek, Ph.D..
- [4.] **NEZBEDOVÁ, Anna.** *Nelineární odezva ocelových konstrukcí na statické zatížení.* Brno, 2013. str. 57. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební mechaniky. Vedoucí práce prof. Ing. Zdeněk Kala, Ph.D..
- [5.] **NEMETSCHKE Scia.** www.scia-online.cz. [Online] 2008. http://www.scia-online.cz/download/Tutorials/3.1_%28CZ_2008.1%29_Problematika_zadavani_vzpernych_delek.pdf.
- [6.] **MELCHER, Jindřich; KARMAZÍNOVÁ, Marcela; BAJER, Miroslav; SÝKORA, Karel.** *Prvky kovových konstrukcí.* Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební.
- [7.] **LEPŠ, Matěj.** *Současná a minulé výuka.* [Online] 2008.
http://klobouk.fsv.cvut.cz/~leps/teaching/ankc/cviceni_08.pdf.
- [8.] **JURČÍKOVÁ, Anežka, a další, a další.** *Stavební statika.* [Online]
http://fast10.vsb.cz/michalcova/Statika15/stavebni_statika_18.pdf.
- [9.] **BÁRTLOVÁ, Alice.** *Vzpěr prutových soustav.* Praha : SNTL - nakladatelství technické literatury, 1977. str. 218.
- [10.] ČSN EN 1991-1-4. *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-4: Obecná zatížení - Zatížení větrem.* Praha : Český normalizační institut, 2007. str. 124.
- [11.] ČSN EN 1991-1-3. *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-3: Obecná zatížení - Zatížení sněhem.* Praha : Český normalizační institut, 2005. str. 51.
- [12.] ČSN EN 1991-1-1. *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby.* Český normalizační institut : autor neznámý, 2006. str. 124.
- [13.] ČSN EN 1991-1-1. *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-1: Obecná zatížení - Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb.* Praha : Český normalizační institut, 2004. str. 44.
- [14.] ČSN 73 1401. *Česká technická norma. Navrhování ocelových konstrukcí.* místo neznámé : Český normalizační institut, 1998. str. 136.

Seznam základních použitých zkratk

l	- délka
l_{cr}	- kritická délka
b	- šířka
h	- výška
t	- tloušťka
E	- modul pružnosti v tahu
G	- modul pružnosti ve smyku
f_y	- mez kluzu
f_u	- mez pevnosti
A	- plocha
I	- moment setrvačnosti
i	- průřezový modul
I_t	- moment setrvačnosti v prostém kroucení
I_ω	- výsečový moment setrvačnosti
i	- poloměr setrvačnosti
g	- spojitě stálé zatížení
G	- soustředěné stálé zatížení
q	- osamělé proměnné zatížení
Q	- soustředěné proměnné zatížení
γ_M	- součinitel spolehlivosti a bezpečnosti
F	- zatěžovací síla
F_{cr}	- kritická síla
N	- normálová síla
V	- posouvající síla
M	- ohybový moment
σ	- napětí
e	- imperfekce
w	- posun
β	- součinitel vzpěrné délky
λ	- kritická štíhlost
$\bar{\lambda}$	- srovnávací štíhlost
F_{cr}	- kritická síla
χ	- součinitel vzpěrnosti

Seznam příloh

- 01 Výkres dispozice
- 02 Vybrané detaily